



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Evolución y tendencias en el uso de aparatos de vía en líneas de alta velocidad

Treball realitzat per:

Cristian Longo Barrio

Dirigit per:

Andrés López Pita

Grau en:

Enginyeria civil

Barcelona, juny 2018

Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori

TREBALL FINAL DE GRAU





RESUMEN

La existencia de aparatos de vía resulta fundamental para la correcta explotación del sistema ferroviario. Siguiendo esta premisa, se pretende poner en valor la importancia de dichos aparatos, analizando las características necesarias que hacen posible el paso de los vehículos por vía desviada y estudiando los aspectos y repercusiones que pueden llegar a tener dentro del conjunto de la vía.

En primer lugar, se expondrán los elementos constituyentes de un desvío, comunes tanto en vías convencionales como en alta velocidad, analizando sus funciones y los criterios de diseño establecidos para su correcto funcionamiento, además de enumerar los diferentes tipos de aparatos de vía existentes y su propósito.

En segundo lugar, se pasará a analizar la evolución sufrida por estos elementos para alcanzar las solicitaciones que requiere la explotación de líneas de alta velocidad y como dicha evolución ha dado pie a la aparición de nuevos modelos, considerando las premisas fundamentales en su diseño, es decir, permitir el paso por vía desviada a una mayor velocidad que en vías convencionales sin que esto repercuta en el confort del viajero y teniendo presente que las soluciones deben ser seguras, fiables y que requieran un bajo mantenimiento.

Para concluir, se repasará la situación actual de desvíos en diversos países (España, Francia y Alemania) y se intentará conocer cuál es la tendencia de estos elementos que componen la vía.

Palabras clave: Aparatos de vía, desvío, cambio, cruzamiento, alta velocidad, evolución, ferrocarril.



ABSTRACT

The existence of railway turnouts is essential to the correct operation of the railway system. In this line, the main idea is to give a general point of view about the importance of this elements and analyse the characteristics needed to allow the vehicle to pass through the diverging lane but also know the aspects and repercussion that turnouts may have in the entire system.

First of all, the study will analyse the elements of a railway turnout, commons in conventional and high-speed lines, studying its function and the design criteria established for its proper operation. In addition, it will comment the types of railway turnouts and its purpose.

Secondly, the study will be focused on the evolution suffered by this element to reach the requirement necessary for their installation in the high-speed system and how, this evolution, has caused the appearance of new models, combining these new requirements, such as the increase of speed through the diverging line without affecting the confort, with the need of preserving high security and reliability standards with a low maintenance cost.

As a final part, the study pretends to give a global overview of high-speed turnouts comparing different country's systems and trying to figure which will be the future of high-speed turnouts.

Keywords: Turnout, switch, crossing, high-speed, evolution, railway.



ÍNDICE

1. Introducción	7
2. Objetivo y alcance del estudio	8
3. Contextualización del estudio	9
3.1. Desarrollo histórico en el ferrocarril y la vía	9
3.1.1. Edad antigua. Los caminos guiados	9
3.1.2. Edad moderna y siglo XIX. De las minas al servicio público	9
3.1.3. Edad contemporánea. Desde el monopolio hasta la alta velocidad	10
3.2. Infraestructura y superestructura ferroviaria	12
3.2.1. Carril	13
3.2.2. Placas de asiento	13
3.2.3. Traviesas y sujeciones	14
3.2.4. Balasto	15
3.2.5. Vía en placa	16
4. Aparatos de vía convencionales	17
4.1 Definición	17
4.2. El desvío	17
4.2.1. Definición	17
4.2.2. Partes del desvío: El cambio	18
4.2.2.1. Contraagujas	19
4.2.2.2. Espadines o agujas	20
4.2.2.2.a. Parámetros teóricos	20
4.2.2.2.b. Perfiles de los espadines	21
4.2.2.2.c. Tipos de espadines	22
4.2.2.3. Tirantes de maniobra	22
4.2.2.4. Cerrojos	22
4.2.2.5. Placa o cojinete de resbalamiento	23
4.2.2.6. Dispositivo de anclaje	23
4.2.3. Partes del desvío: El cruzamiento	23
4.2.2.1. Patas de liebre	24
4.2.2.2. Corazón	24
4.2.2.3. Contracarril	25
4.2.4. Partes del desvío: Los carriles de unión	26
4.2.5. Asiento de los desvíos	26
4.2.6. Sobreancho y peralte	27
4.2.7. Tipos de desvíos sencillos según vista en planta	27
4.2.8. Tipos de desvíos convencionales RENFE	28
4.2.9. La señalización de los desvíos en las vías ferroviarias	30
4.3. Otros aparatos de vía	32
4.3.1. Desvíos dobles	32
4.3.2. Travesías	32
4.3.3. Escapes	33
4.3.4. Diagonales	33
4.3.5. Puentes giratorios	33
4.3.6. Lazos y triángulos de vía	34



4.3.7. Saltos de carnero	34
5. Criterios de diseño de aparatos de vía convencionales	35
5.1. Cálculo aproximado de un desvío	35
5.2. Trazado práctico de un desvío	38
5.3. Esfuerzos y estudio cinemático y dinámico de la entrada de un desvío	40
5.3.1. Esfuerzos transversales	40
5.3.1.1. Esfuerzos producidos por las ruedas	41
5.3.1.2. Esfuerzos producidos por los ejes	42
5.3.2. Esfuerzos longitudinales	42
5.3.3. Estudio cinemático y dinámico en la entrada de un desvío	42
5.4. Cálculo de la entrecalle y la laguna del cruzamiento	45
5.4.1. Entrecalle carril-contracarril	45
5.4.2. Entrecalle aguja-contraaguja	46
5.4.3. Laguna	47
6. Aparatos de vía para alta velocidad	48
6.1. Introducción	48
6.2. Problemáticas de los aparatos de vía convencionales para su uso en alta velocidad	49
6.2.1. Ángulo de cruzamiento	49
6.2.2. Aceleración transversal	50
6.3. Desvíos sobre balasto	50
6.3.1. Cambio	50
6.3.1.1. Inclinación	50
6.3.1.2. Perfil de las agujas	51
6.3.1.3. Optimización de la marcha	53
6.3.1.4. Antideslizantes térmicos	54
6.3.2. Cruzamientos móviles	54
6.3.2.1. Corazón de punta móvil	54
6.3.2.2. Corazón de patas de liebre móviles	55
6.3.2.3 Contracarril y patas de liebre	56
6.4. Desvíos sobre vía en placa	56
6.5. Escapes	57
6.6. Trazado de aparatos de vía de alta velocidad	57
6.7. Puesta en obra	59
6.8. Mantenimiento	60
6.9. Casos prácticos	61
6.9.1. España	61
6.9.2. Francia	62
6.9.3. Alemania	63
6.10. Tendencias	64
6.10.1. Voestalpine BWG	65
6.10.2. Vossloh Cogifer SA	66
6.10.3. Telice	67
6.10.4. WIRAS	67
7. Conclusiones	69
8. Referencias	71



1. INTRODUCCIÓN

La explotación del ferrocarril como medio de transporte, tanto de personas como de mercancías, supuso una verdadera revolución y un elemento fundamental en la evolución social y económica de cada país, puesto que cambió el concepto existente de movilidad propiciando un verdadero cambio en la percepción del tiempo.

Debido a la tecnología de guiado sobre carriles característica del ferrocarril, resulta necesaria la implementación de sistemas que permitan el cruce de vías para posibilitar a los vehículos que circulan sobre esta tomar la dirección deseada. Dichos sistemas se conocen como aparatos de vía.

Resulta interesante observar que, aun siendo una parte fundamental dentro de la explotación de las líneas comerciales, las referencias sobre los aparatos de vía en la literatura son relativamente escasas comparadas con otros elementos que componen la infraestructura ferroviaria, sobre todo conociendo que estos sistemas tienen una longitud relativa menor al 5% del total de la línea, pero el coste de su mantenimiento supone el 17% del total (*Network Rail, 2012*). Este dato pone énfasis en la necesidad de producir y diseñar aparatos de vía que mantengan sus propiedades durante un largo periodo de tiempo para lograr que su reparación y mantenimiento sean lo más económicos posibles.

El estudio de los aparatos de vía necesita de una visión del conjunto de la línea, ya que su fallo puede producir importantes retrasos y hasta el corte del tráfico, con el consiguiente coste por parte de los operadores ferroviarios. Este hecho provoca que sean necesarios aparatos de vía de alta fiabilidad.

La evolución y diseño de los elementos que componen la vía y en especial de los desvíos ferroviarios han estado íntimamente ligadas a las necesidades de explotación de cada operador ferroviario, por lo que no es de extrañar que con la llegada de la alta velocidad se produjera un cambio en el diseño y fabricación de los aparatos de vía, adaptándolos a esta nueva realidad sin dejar de ser un elemento singular en el conjunto de la infraestructura ferroviaria.



2. OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

Siendo los aparatos de vía la parte más débil dentro de la infraestructura ferroviaria, es curioso destacar que las referencias sobre dichos elementos han sido, al menos tradicionalmente, bastante limitadas comparadas con otros elementos que constituyen la misma. Debido a esto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la necesidad, importancia y repercusión, pasada, presente y futura, de los aparatos de vía al paso por vía desviada.

Para llevar a cabo dicho análisis, será necesario definir las funciones y componentes de los aparatos de vía. Dicho proceso se llevará a cabo utilizando como hilo conductor su evolución a lo largo de la historia, desde el inicio de su aplicación hasta la actualidad, haciendo hincapié en las líneas de alta velocidad. Se compararán los diferentes criterios de diseño debido a las exigencias requeridas por dichos aparatos para su correcto funcionamiento y explotación, haciendo referencias relativas a la repercusión económica asociada a su uso. También se pretende dar una visión global de los aparatos de vía comentando similitudes y diferencias con la alta velocidad y como esta última ha repercutido en su diseño.

Como objetivo final, se propone la realización de un análisis prospectivo de los aparatos de vía para estudiar la necesidad de mejora de sus prestaciones para poder dar cumplimiento a las exigencias que este medio de transporte y por ende la sociedad solicita.



3. CONTEXTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Para poder llevar a cabo un análisis completo sobre la evolución de los aparatos de vía es necesario conocer, al menos a grandes rasgos, los motivos que provocaron la necesidad del desarrollo de la tecnología del ferrocarril y su infraestructura y cómo estos se han convertido en una estampa habitual en nuestros paisajes.

3.1. Desarrollo histórico del ferrocarril y la vía

3.1.1. Edad antigua. Los caminos guiados

Aunque la aparición del ferrocarril como se conoce en la actualidad es relativamente reciente, el concepto relativo al uso de unos carriles para disminuir el rozamiento y que estos guíen a los vehículos se remonta ya a la edad antigua. Se han encontrado restos de carriles de bronce en las inmediaciones de las Pirámides de Gizeh. Más tarde, en la Grecia clásica, se tiene constancia de un camino guiado llamado *diolkos* utilizado para transportar barcos por el istmo de Corinto, como esquematiza la figura 1.1 (Lewis, 2011).

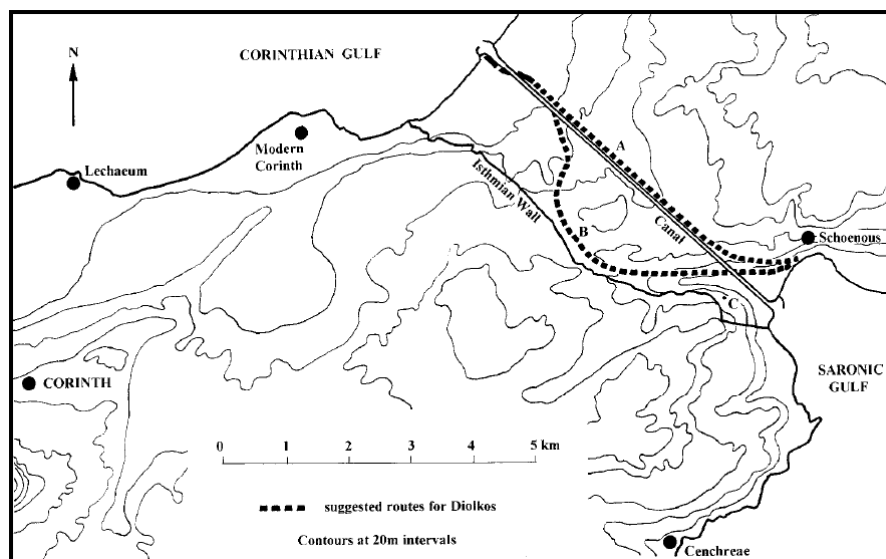


Figura 3.1. Posibles rutas para el Diolkos. (Fuente: Lewis, 2011)

3.1.2. Edad moderna y siglo XIX. De las minas al servicio público

Ya entrados en la edad moderna, en algunas minas de Alemania, los mineros transportaban el material extraído de las minas en vagones a través de un sistema de carriles de madera tirados por caballos. Durante el siglo XVI estos mismos mineros emigraron a Reino Unido para explotar las minas de carbón inglesas, llevándose consigo este sistema de transporte.



Consolidado dicho sistema en Inglaterra y debido al bajo precio del hierro durante el tercio final del siglo XVIII, surgieron nuevas ideas para el uso de este material. Una de ellas fue el uso de lingotes de una mayor longitud de los que se usaban en la época para fijar sobre los carriles de madera de las vías mineras para luego retirarlos cuando el precio del hierro subiera.

Durante el primer tercio del siglo XIX, este sistema no solo se mantuvo, sino que se optimizó obteniendo, finalmente, formas y longitudes que se asemejan a las de los carriles actuales (García Lomas, 1975).

Paralelamente a la evolución de los carriles, la invención de la máquina de vapor por Watt durante el siglo XVIII permitió ya entrados en el siglo XIX la aparición de diversos tipos de locomotoras a vapor, siendo la primera la creada a principios de siglo por el ingeniero inglés Trevithik. Estas locomotoras se adaptaron rápidamente al sistema de transporte minero substituyendo así a la tracción por sangre.

No fue hasta el año 1825 que se inauguró la primera línea de ferrocarril abierta al público, gracias a George Stephenson, quien se encargó de su construcción. Dicha línea unía Stockton con Darlington, con una longitud de 16 km. Este hito provocó una creciente fiebre por el ferrocarril a escala mundial, aumentando el prestigio internacional de los países que poseían este servicio y cambiando radicalmente la visión del transporte.

3.1.3. Edad contemporánea. Desde el monopolio hasta la alta velocidad

Durante los años venideros, el ferrocarril se fue afianzando como medio de transporte y tanto países europeos como Estados Unidos implantaron esta nueva tecnología que no tardó en copar el monopolio en el transporte. Para ilustrar dicho afianzamiento, se dispone la tabla 3.1, que ilustra los kilómetros de vía de diferentes países a mediados del siglo XIX.

<i>País</i>	<i>Año</i>	<i>Longitud (km)</i>
<i>Estados Unidos</i>	<i>1850</i>	<i>13.600</i>
<i>Francia</i>	<i>1850</i>	<i>3.627</i>
<i>Alemania</i>	<i>1845</i>	<i>2.126</i>
<i>Bélgica</i>	<i>1850</i>	<i>1.000</i>
<i>España</i>	<i>1855</i>	<i>475</i>

Tabla 3.1. Longitud de vía según países. (Fuente: García Lomas, 1972)

El ferrocarril deviene rápidamente un factor relevante para conocer el desarrollo económico de cada país. En el caso de España, esta nueva tecnología no se implantó con la misma celeridad que en los países europeos. Cabe destacar que su primera línea se construyó en una de sus colonias de ultramar, Cuba, donde se inauguró en 1837 y conectaba las ciudades de La Habana y Güines.



La tendencia del uso del ferrocarril no se redujo durante el siglo XIX. Las locomotoras evolucionaron y se transformaron en máquinas cada vez más potentes y rápidas. No fue hasta el comienzo del siglo XX cuando apareció un nuevo sistema más ligero, limpio, y eficiente que las locomotoras a vapor, las locomotoras eléctricas. Estas se introducirán rápidamente en las ciudades dando paso a los tranvías electrificados.

Paralelamente a la electrificación de líneas de ferrocarril, a mediados de siglo se introdujeron los motores diésel en las líneas no electrificadas, siendo estos más ligeros y rápidos que los trenes a vapor.

Por último, debido a la aparición del automóvil y el avión, el transporte por ferrocarril ha dejado de ocupar el monopolio que había obtenido y ha tenido que reinventarse, especializándose en los ámbitos donde realmente es competitivo para poder paliar las limitaciones técnicas de las cuales carecen sus competidores. Entre otras carencias se podrían destacar: el hecho que la mayoría de líneas se construyeron durante el siglo XIX y su trazado en planta está provisto de curvas que limitan su velocidad comercial o que las rampas máximas permitidas debido a la configuración rueda-carril han de ser inferiores comparados con la red viaria. Estas necesidades han producido que las diferentes administraciones ferroviarias adaptaran durante finales de siglo XX los trazados ya existentes por otros con una geometría más favorable para alcanzar velocidades mayores, evolucionando hasta la alta velocidad. A modo de comparativa con sus competidores directos, la tabla 3.2 relaciona la diferencia de trazados en kilómetros de los itinerarios de diversos países europeos. Se puede ver que, para un mismo itinerario, el ferrocarril necesita recorrer una distancia mayor respecto a otros modos de transporte.

<i>País</i>	<i>Distancia (km)</i> <i>por ferrocarril respecto a</i>		<i>Índice relativo</i>	
	<i>Carretera</i>	<i>Aviación</i>	<i>Carretera</i>	<i>Aviación</i>
<i>Alemania</i>	<i>+42</i>	<i>+160</i>	<i>54</i>	<i>91</i>
<i>España</i>	<i>+78</i>	<i>+176</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
<i>Francia</i>	<i>+68</i>	<i>+163</i>	<i>87</i>	<i>92</i>
<i>Italia</i>	<i>+36</i>	<i>+108</i>	<i>46</i>	<i>61</i>

Tabla 3.2. Comparación de distancias kilométricas en los principales itinerarios nacionales de algunos países europeos por modos de transporte. (Fuente: López Pita, 2006)

Como consecuencia de esta especialización y como figura en la tabla 3.3, hoy en día las grandes potencias económicas mundiales han apostado claramente por la implementación de líneas de alta velocidad en su territorio para dar respuesta a las necesidades actuales.



País	Longitud (km)				
	En servicio	En construcción	Proyectadas	Planificadas	Total
España	2.852	904	1.061	-	4.817
Italia	896	53	-	152	1.101
Alemania	1.658	185	-	210	2.053
Francia	2.776	-	-	1.786	4.562
China	26.869	10.738	1.268	257	39.132
Japón	3.041	402	194	-	3.637

Tabla 3.3. Líneas de alta velocidad ($v \geq 250 \text{ km/h}$) según países a fecha abril 2018. (Fuente: UIC, 2018)

3.2. Infraestructura y superestructura ferroviaria

Conocida la evolución histórica de este medio de transporte, resulta interesante introducir los conceptos básicos de su infraestructura antes de proceder al estudio de los aparatos de vía con el objetivo de comprender su función dentro del sistema y la necesidad de su correcto diseño para la optimización del servicio respondiendo a los requerimientos de cada época.

Cabe destacar que se considera infraestructura ferroviaria todos los elementos sobre los que se sitúa la superestructura y contempla desde las obras de tierra, desmontes o terraplenes hasta puentes y túneles, necesarios para construir la plataforma o explanación. Por ende, se considera como superestructura ferroviaria las vías, las instalaciones de señalización, telecomunicación y electrificación que permiten la circulación de los trenes y que reposan normalmente sobre un lecho de balasto, como representa parcialmente la figura 3.2.

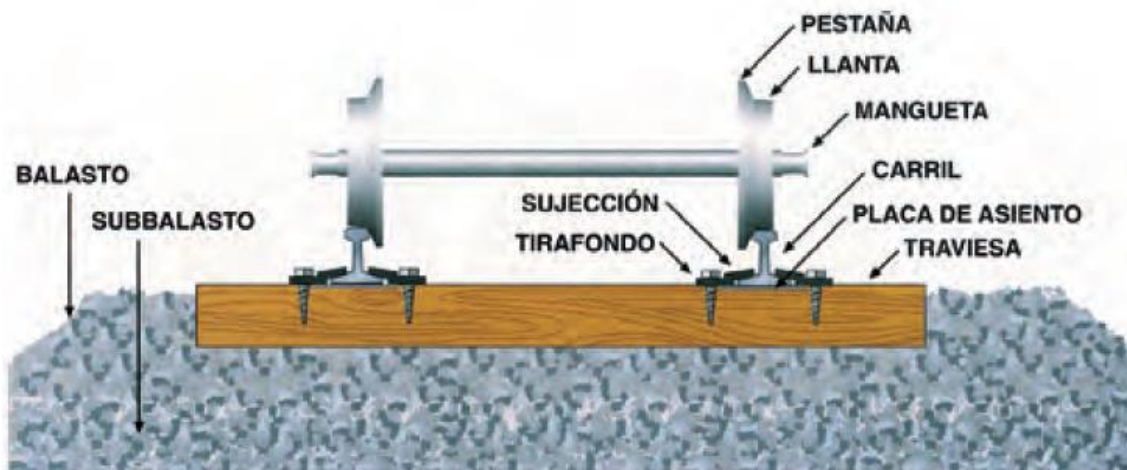


Figura 3.2. Detalle transversal de los elementos superestructura. (Fuente: López Pita, 2006)

Seguidamente se pasará al desglose y comentario de cada elemento que forma la superestructura viaria.



que en las segundas tienen como objetivo reducir la rigidez de la vía debido a los esfuerzos dinámicos y las fisuras en el hormigón inducidas por efectos de fatiga.

3.2.3. Traviesas y sujeciones

Las traviesas son las encargadas de servir de soporte a los carriles para que estos mantengan el ancho de vía y además son las responsables de repartir, lo más uniformemente posible, las cargas recibidas del carril a las capas inferiores.

Su diseño, como el de todos los elementos de este modo de transporte, ha ido evolucionando según los avances tecnológicos. En sus inicios se utilizaron traviesas de madera, que a su vez estaban sujetas a los carriles por tirafondos o escarpas (sujeciones rígidas). Debido a las características del material y a este tipo de sujeciones e inducidas por los esfuerzos de fatiga, las traviesas se agrietaban y como consecuencia se producía el aflojamiento de las mismas. Este problema se contenía a través del zunchado de las traviesas.

Por este motivo se adoptaron sujeciones flexibles y con posterioridad, se introdujo el hormigón (siglo XX) como nuevo material para la elaboración de traviesas en las nuevas líneas ferroviarias y de la alta velocidad. Debido a este cambio de material, se produjo un aumento en la vida útil de estos elementos, que mantienen sus capacidades portantes durante más tiempo, tienen una mayor resistencia a esfuerzos transversales y, debido a su área de apoyo, reducen las presiones transmitidas al balasto. Como contrapartida, su peso es un factor para nada despreciable a la hora su montaje. A modo de ejemplo, la figura 3.4 esquematiza una traviesa monobloque.

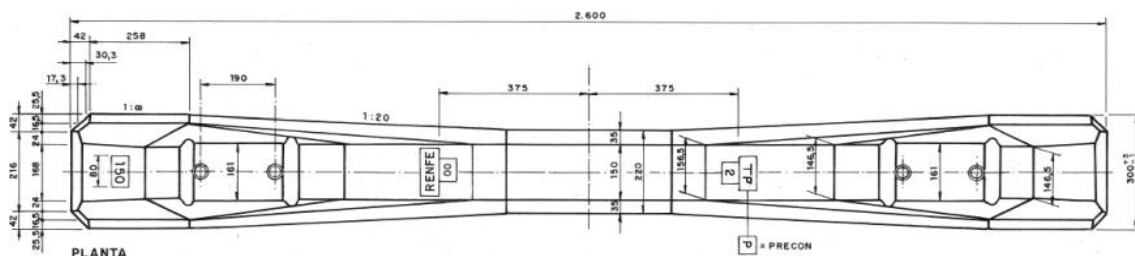


Figura 3.4. Traviesa monobloque, cotas en mm (Fuente: NRV3121)

Dentro de todas las tipologías de traviesas de hormigón se destacan las traviesas tipo RS y las de tipo monobloque. Las primeras se componen por dos cubos de hormigón unidos por una riostra y las segundas recuerdan la forma que los carriles de madera.

Debido a la rigidez del hormigón respecto a la madera, fue necesario el empleo de sujeciones con una mayor elasticidad para lograr una transmisión de cargas que no afectara al balasto. A modo de ejemplo se enuncian las de tipo NABLA y VOSSLOH, ilustradas en la figura 3.5.



Figura 3.5. Sujeciones NABLA y VOSSLOH respectivamente (Fuente: López Pita, 2006)

3.2.4 Balasto

El balasto es un material granular (con un diámetro de entre 20 a 60 mm para permitir el drenaje y para evitar lajas, difíciles de compactar) que proporciona elasticidad en la superestructura y tiene como función la repartición de las cargas verticales hacia la plataforma para que esta resista y no se alcance su capacidad resistente, absorber las cargas horizontales impidiendo el desplazamiento de la vía, tanto longitudinal como transversalmente y resistir la abrasión en el caso de contacto con estructuras rígidas. Es necesario, para que se cumplan estas condiciones que el material esté correctamente compactado a través del bateado de la vía. Cabe destacar que, a mayor tamaño de las partículas de balasto, su compactación resultará más difícil.

Además, el material ha de cumplir con las prescripciones técnicas (FOM/1269/2006, del 17 de abril). A modo de síntesis, se enumeran algunos parámetros fundamentales:

- Coeficiente de Deval: Es el parámetro que corresponde a la abrasión y debe ser mayor a un límite para que se acepte el material. A mayor resistencia a la abrasión, mayor será el coeficiente.
- Coeficiente de Los Ángeles (CLA): Determina el deterioro de las partículas de balasto debido al sucesivo paso del tráfico (deflexión vertical) por el golpe de la traviesa con el material. Es necesario que este coeficiente sea menor a un límite para que se pueda aceptar ($CLA < 18$ para líneas convencionales y $CLA < 15$ para alta velocidad)
- Coeficiente dureza global (DR): Agrupa en un solo coeficiente los dos anteriores. Se emplea principalmente para líneas de alta velocidad y para líneas convencionales de velocidades altas ($V > 200 \text{ km/h}$). Se estipula $DR = 20$ para líneas de alta velocidad.



3.2.5. Vía en placa

Debido a las sucesivas operaciones de mantenimiento necesarias en las líneas construidas sobre balasto, durante los años setenta, en Japón, se introdujo la vía en placa. Los factores impulsores para la implantación de esta modalidad son, además de la reducción de operaciones de mantenimiento, que debido a su alto volumen de viajeros, el tiempo de mantenimiento es bajo, además, las condiciones de la orografía japonesa requieren en su trazado una gran cantidad de tramos en puente y túnel. Este elemento substituye la superestructura de balasto por losas de hormigón prefabricado que se apoyan sobre una plataforma, también de hormigón, como se puede observar en la figura 3.6, permitiendo evitar así los inconvenientes anteriores y también el denominado vuelo del balasto, que en el caso de velocidades mayores a 300 km/h, ocasiona desperfectos en los carriles debido a su desprendimiento de partículas de balasto de la capa compactada.

Debido a la elevada rigidez del hormigón respecto al balasto, es necesaria la implementación de almohadillas elásticas para reducir la rigidez global ya que absorben parte de las vibraciones y reducen así las operaciones de mantenimiento que, en este caso, tienen un coste más elevado respecto al balasto.



Figura 3.6. Escape doble sobre vía en placa (Fuente: International Railway Journal, 2013)



4. APARATOS DE VÍA CONVENCIONALES

4.1. Definición

Habiendo analizado la evolución del ferrocarril y su contexto en la sociedad, se puede entrever la importancia de cada uno de los elementos que lo conforman. Cabe destacar que los aparatos de vía conforman el punto débil de la infraestructura ferroviaria por lo que es necesario conocer sus funciones y los elementos que lo conforman para poder optimizar su diseño dentro de los requerimientos del sistema.

Se define como aparato de vía a los dispositivos que, colocados en la confluencia entre dos o más vías, permiten el paso o cruce de una vía a otra sin interrupción de la marcha, logrando la continuidad del camino de rodadura. Como norma general, los aparatos de vía se concentran en estaciones e intercambiadores, pero también pueden encontrarse donde exista alguna bifurcación o donde sea necesario conectar vías de doble sentido para permitir circulación en sentido contrario. Este último caso es típico en líneas de alta velocidad ya que, debido a la optimización de su explotación, es necesario disponer de vías que permitan la circulación de doble sentido de marcha de los trenes.

Debido a las exigencias de la explotación ferroviaria y al hecho que los aparatos de vía en si mismos son una singularidad en el trazado, estos están obligados a cumplir unas ciertas condiciones, ya sean geométricas, cinemáticas o dinámicas dependiendo de los vehículos que vayan a circular por ellos.

En adición, el establecimiento de los diversos tipos de aparatos de vía viene definido por aspectos como la seguridad, maniobrabilidad y conservación ya que al ser estos un punto singular y existiendo discontinuidades en el camino de rodadura pueden conllevar a problemas. Es necesario también considerar que la conservación de estos elementos sea lo menos costosa y rápida posible para evitar afectaciones en el tránsito, por lo que es conveniente que sean de una alta resistencia y con un coste lo mas bajo posible.

A continuación, se procede a detallar los diferentes tipos de aparatos de vía, así como sus especificaciones y otras informaciones interesantes para su estudio.

4.2. Desvíos

4.2.1. Definición

Elementos que permiten la circulación de una vía a otra o varias debido a la existencia de un acuerdo tangencial entre dichas vías. En el caso más sencillo, el desvío simple, se da paso a la circulación de una vía a otra, siendo la primera definida como *vía directa* y la segunda *vía desviada* como se muestra en la figura 4.1. Existen también los desvíos dobles o triples según la necesidad de explotación de cada línea. La propia longitud del desvío viene acotada por las juntas que se encuentran a principio y fin de este.



Como también se puede observar en la figura 4.1., un desvío simple se compone de tres partes para llevar a cabo el cambio entre vía directa a desviada. A continuación, se procede a definir cada una de sus partes y su función.

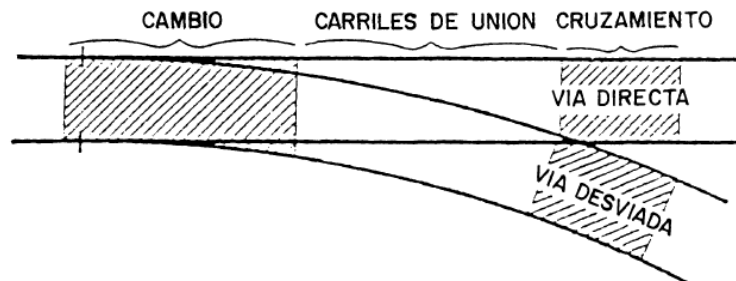


Figura 4.1. Esquema simplificado desvío simple. (Fuente: Bugarín y García Díaz de Villegas, 1989)

4.2.2. Partes del desvío: El cambio

El cambio es la primera parte del desvío, en él se produce la separación de los carriles que acabarán formando la vía directa y la desviada y según la posición de sus elementos, se producirá el paso hacia la vía que este determine. Este mismo elemento viene formado a su vez por diversas partes, las más importantes reflejadas en la figura 4.2.

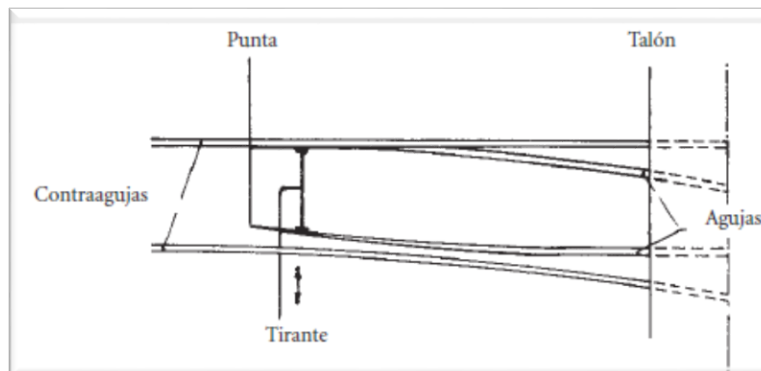


Figura 4.2. Esquema de un cambio sencillo y sus elementos principales. (Fuente: López Pita, 2006)

Cabe destacar que, como los demás elementos de la superestructura ferroviaria, los cambios no han sido excepción y han experimentado una notable evolución. Los primeros cambios se componían de carriles móviles articulados desde el inicio del desvío, rotando sobre este punto estableciendo un camino continuo ya sea por vía directa o desviada (*García Lomas, 1972*), con el inconveniente que si el vehículo no tomaba la dirección de las vías, este descarrilaría al hallarse en una discontinuidad. Esta conexión queda patente en la figura 4.3. No fue hasta el año 1832, cuando el ingeniero Charles Fox patentó lo que ahora conocemos como cambios sencillos.



Figura 4.3. Primeros cambios sin aguja. (Fuente: Library of Congress, 2018)

4.2.2.1. Contraaguja

Se denominan así los carriles exteriores y fijos donde se acoplan los *espádenes*. Considerando un desvío recto, las contraaguja pueden ser curvas o rectas dependiendo si corresponden al carril de la vía directa o desviada. Están dispuestas de tal forma que la aguja se resguarde en la contraaguja y frecuentemente se realiza el cepillado su cara interior para reforzar la punta de la aguja.

Entre sus características destaca la existencia de unos orificios en el alma para alojar los tornillos de los cojinetes de resbalamiento, dispositivos de anclaje y accionamiento del cambio, esquematizados en la figura 4.4.

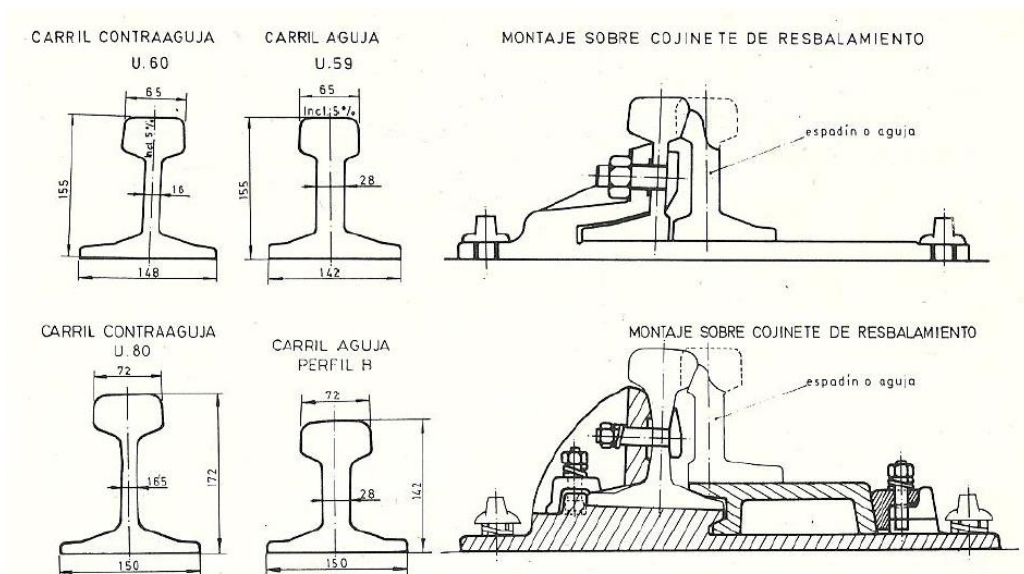


Figura 4.4. Cambio tipo 50kg U.36 y 60 kg U.80. (Fuente: Oliveros, 1977)



4.2.2.2. Espadines o agujas

Reciben este nombre los carriles móviles del cambio, articulados en sus extremos, llamados *talones*, permitiendo el desdoblamiento de las vías y obligando al vehículo ferroviario a tomar la dirección deseada.

Sea cual sea la dirección tomada por el tren, el funcionamiento de los espadines permite que solo uno de ellos se acople totalmente a su contraaguja quedando inmovilizada, mediante dispositivos de seguridad, dejando una huella entre aguja y contraaguja opuesta para permitir el paso de la pastaña del vehículo.

Como se expondrá más adelante en el caso de un desvío recto, el espadin que conduce a la vía desviada será recto mientras que el opuesto, aquel que permiten al vehículo seguir por la vía directa, será curvo, inversamente a lo que ocurre con los contracarriles, que será recto para vía directa y curvo para la desviada como muestra la figura 4.7.

Existe la posibilidad de que un cambio sea tomado de punta o de talón, en este segundo caso, si la aguja está abierta se permitirá el paso del vehículo sin mayores complicaciones, pero si esta se encuentra cerrada la rueda separará el acoplamiento de aguja y contraaguja, en este caso se define que el cambio ha sido *talonado*, pudiendo producir la rotura de los tirantes y un posible descarrilamiento.

El talonamiento del cambio no conlleva necesariamente una maniobra incorrecta por parte del vehículo u operador, sino que puede deberse a solicitudes de la misma vía. Es el caso de líneas secundarias o con poco tráfico, donde puede ser habitual reduciendo así los costes de explotación. En estos casos las agujas se accionan independientemente y vuelven a su posición primitiva automáticamente.

4.2.2.2.a. Parámetros teóricos

Desde el punto de vista teórico, la aguja es tangente a la contraaguja por lo que, para que esto ocurra, su extremo debería pasar a tener un espesor igual a cero. Constructivamente, este límite es prácticamente inalcanzable por lo que el espesor de la aguja se aproxima a 5,5 mm (*Bono et. Al., 1997*). Estas diferencias provocan la coexistencia de dos puntas de aguja: La primera, teórica, llamada *Punta Matemática de la Aguja* que corresponde al punto donde tendría que acabar la aguja desde un punto de vista matemático y una segunda, real, la *Punta Real de la Aguja*, correspondiente al final real de la aguja.

Debido a esta diferencia entre punta real y punta matemática, los ejes de la aguja y la contraaguja forman el denominado *ángulo de desviación* (β). Mientras que se define el *ángulo de ataque* (θ) como aquel que aborda la rueda al pasar por la aguja, mostrados en la figura 4.5.



Es recomendable que el ángulo de desviación sea el menor posible, pero su reducción implica el aumento de la longitud de las agujas, provocando así que se necesiten unas puntas de aguja más finas.

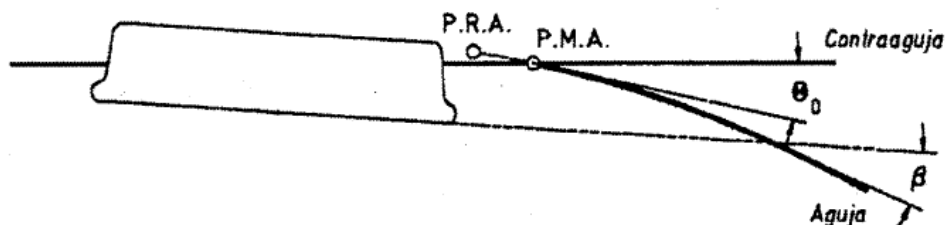


Figura 4.5. Diferencia entre punta real (PRA) y punta matemática (PMA). (Fuente: García Díaz de Villegas, 2009)

4.2.2.2.b. Perfiles de los espadines o agujas

Como muestra la figura 4.6, las agujas presentan un espesor creciente con respecto a su longitud, con una extremidad afilada en el origen del desvío para permitir su perfecto acoplamiento sobre las contraagujas y acabando con el espesor propio del carril. Estas pueden tener una altura igual o menor a la de las contraagujas. Para lograr dicho aumento de espesor, proporcionar un camino continuo y sin distorsiones se pueden emplear:

- Carriles ordinarios: Mediante un proceso de cepillado se da forma al carril. El uso de este tipo de carriles comporta que durante su cepillado se pierda estabilidad al perder parte de su patín y por consiguiente una reducción de su resistencia.
- Carriles tipo *Brunel* o *asimétricos*: Estos tipos de carriles tienen la particularidad de tener una sección de alma mayor, que conlleva un mayor momento de inercia I_y , altura menor a la de la contraaguja y una mayor resistencia transversal. De esta forma, al proceder al cepillado de los carriles, la punta de estos queda a una altura menor y es protegida por la contraaguja, que en este punto es la encargada de resistir los esfuerzos.

Aún así, debido a la situación de los espadines, es necesario que sus puntas resistan a los choques de las ruedas, por lo que en ciertas ocasiones estos carriles se obtienen a partir de acero al manganeso. La adición de manganeso produce un aumento de la dureza del carril reduciendo así su necesidad de mantenimiento.

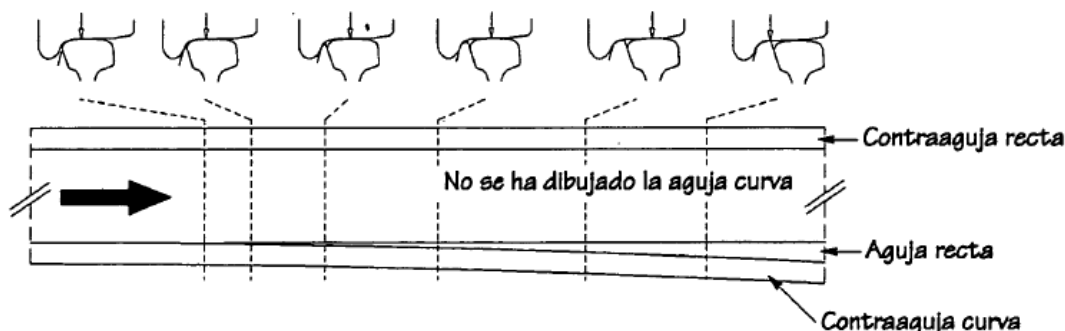


Figura 4.6. Perfil transversal de aguja-contraaguja. (Fuente: Rodríguez Bugarín, 1994)



4.2.2.2.c. Tipos de espadines o agujas

Conocidos estos ángulos y como se ha comentado al principio del apartado 4.2.2.2., las agujas pueden ser curvas o rectas según estas sirvan para mantener al vehículo por vía directa o no respectivamente, como viene ilustrado en la figura 4.7. A igualdad de longitudes entre los distintos tipos de aguja, se obtiene que el ángulo *ángulo de desviación* (β) (García Lomas, 1972) es mayor para una aguja recta que para una curva, llegando al extremo de $\beta=0$ para una curva tangencial.

Considerando ahora el *ángulo de ataque* (θ), conviene reducirlo al mínimo ya que está directamente relacionado con la aceleración centrífuga y por ende al confort del viajero.

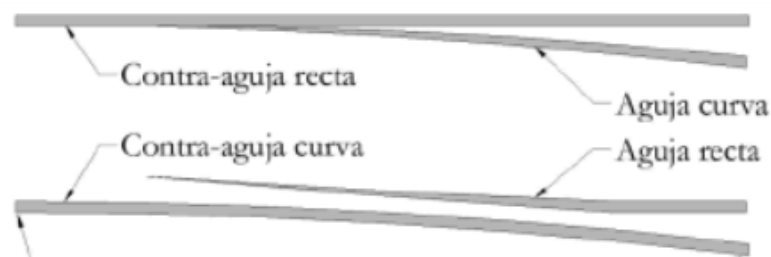


Figura 4.7. Esquema Binomio aguja recta-contraaguja cura v y viceversa. (Fuente: Lagos-Cereceda, 2014)

Hasta los años ochenta y debido a las exigencias constructivas del momento, el radio de dichas curvas era constante. Debido a los avances técnicos (Bono *et. Al.*, 1997) se ha logrado realizar curvas con una curvatura variable (que se analizarán en capítulos posteriores), consiguiendo así que la aceleración centrífuga se reduzca progresivamente durante el paso por el desvío y permitiendo así una reducción de fuerzas transversales sobre las agujas aumentando así su vida útil y reduciendo su mantenimiento.

4.2.2.3. Tirantes de maniobra

Son los elementos que, además de mover las puntas de los espadines, mantienen la separación adecuada entre ellos, permitiendo el correcto paso de las ruedas entre la aguja y el espadín, evitando descarrilamientos y determinando la dirección del vehículo.

Estos tirantes se pueden accionar *manualmente*, hecho que conlleva a que un operario esté en el desvío o sus inmediaciones para accionarlo. Este factor hace inviable el uso de tirantes manuales en estaciones, por ejemplo, debido al número de cambios existentes y la distancia entre ellos. Existe la posibilidad de accionarlos de forma remota, en este caso el tirante es accionado a través de motores eléctricos que activan mecanismos hidráulicos o neumáticos.

4.2.2.4 Cerrojos

Para asegurar que la aguja queda totalmente acoplada a su contraaguja sin holguras se disponen de elementos denominados cerrojos para permitir que la aguja desacoplada se mantenga firme y a una distancia tal que permita el paso de la pestaña. Según la longitud de



la aguja, será necesaria la disposición de más de un cerrojo. Se destaca, a modo de ejemplo, el cerrojo de uña, esquematizado en la figura 4.8.

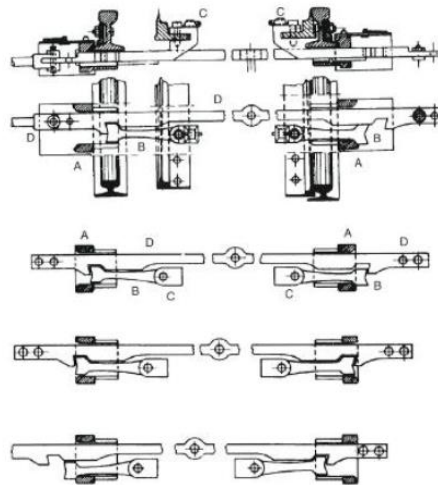


Figura 4.8. Cerrojo de uña. (Fuente: Bugarín y García Díaz de Villegas, 1995)

4.2.2.5. Placa o cojinete de resbalamiento

Es necesario que se asegure la inmovilidad de la aguja cuando esta está acoplada a la contraaguja mediante dispositivos de seguridad y asimismo se debe proporcionar, mediante la *placa o cojinete de resbalamiento* una superficie de deslizamiento transversal de la aguja y el afianzamiento del conjunto aguja-contraaguja en su posición para que resista los esfuerzos generados.

4.2.2.6 Dispositivo de anclaje

Este elemento fija el espadín por su talón y asegura su movimiento horizontal. A modo de ejemplo se expone el dispositivo de anclaje de tipo cojinete-placa. Este elemento une el carril y el espadín se unen por una brida de hierro, a la altura del talón, que permite su movimiento.

4.2.3. Partes del cambio: El cruzamiento

El cruzamiento es la última parte del desvío y donde existe la superposición de los caminos de rodadura.

Debido a la morfología de la rueda, es necesaria la presencia de una discontinuidad en dichos caminos para que la pestaña y por ende la rueda pueda atravesar el cruzamiento. Esta discontinuidad viene definida como *laguna*, que como se verá más adelante, es fundamental para conocer la velocidad comercial de los desvíos. Los elementos del cruzamiento están esquematizados en la figura 4.9.

Como en el cambio, cada uno de los elementos del cruzamiento realiza una función esencial para su correcto funcionamiento.

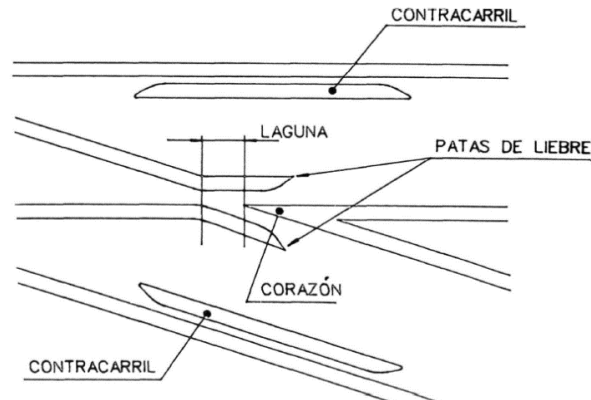


Figura 4.9. Esquema de un cruzamiento convencional (Fuente: Sánchez Doblado, 1992)

4.2.3.1. Patas de liebre

Se denomina así a los extremos de los carriles interiores del desvío que, una vez acodados, obtienen una dirección paralela al carril opuesto y soportan el peso de la rueda cuando esta pasa por la laguna.

Además, su ligera apertura en los extremos impide que la rueda de un tren que viniera en dirección opuesta se encontrara con un carril cortado abruptamente y pudiera producir su deterioro o problemas en el confort del pasajero.

4.2.3.2. Corazón

Es la parte donde se produce la unión de los carriles de la vía directa y desviada. Debido a este motivo, es considerado el elemento más delicado del cruzamiento ya que está sometido a impactos frecuentes por el paso de las ruedas.

Se denomina *punta de corazón* a la parte donde se encuentran los carriles y *talón* al punto más alejado, correspondiendo este con el final del desvío. Como sucede con las agujas, existen dos puntas de corazón, una teórica y otra real, llamadas *punta de corazón real* y la *punta de corazón teórica* respectivamente. En este caso, la punta de corazón real se encuentra retrasada respecto a la teórica para así reducir su deterioro. En adición, esta punta se encuentra rebajada, ya que al existir una diferencia de cota entre la pata de liebre y la punta de corazón se consigue que la rueda no choque con la punta.

Aunque se ahondará en el capítulo quinto, los cruzamientos se designan a partir de la *tangente del ángulo de cruzamiento* (α). El ángulo de cruzamiento es el que forma el cruce de las dos vías.

La construcción del corazón puede llevarse a cabo de diferentes modos, el resultado de fabricación se puede observar, en forma de esquema, en la figura 4.10:

- Carriles ordinarios: Se fabrican a partir del cepillado de los carriles. La punta de corazón corresponde a un único carril ya que el otro se encuentra acoplado a este primero.



- Carriles especiales: El proceso de fabricación es análogo al anterior, pero en este caso la punta de corazón es una pieza más y tiene la peculiaridad de elaborarse un acero de dureza mayor reduciendo así el deterioro.

La disposición de diversas piezas y los impactos de las ruedas producen una deformación heterogénea entre ellas.

- Monobloque: Corazón fabricado de una sola pieza de acero fundido, normalmente con aleación de manganeso (12-14% Mn), incrementando notablemente la resistencia al desgaste.

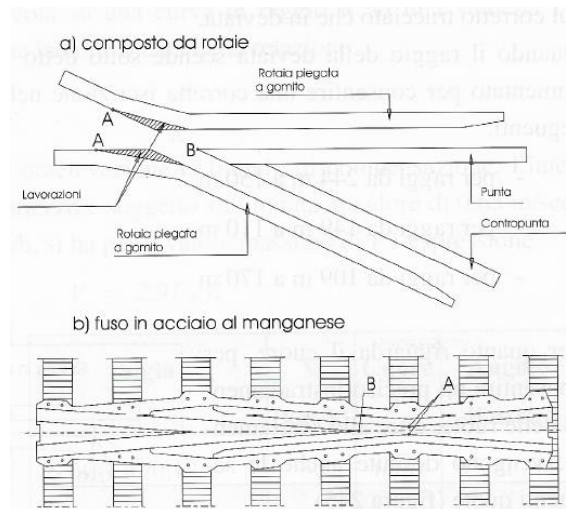


Figura 4.10. Esquema de corazón compuesto por carriles (arriba) y otro monobloque con aleación de Mn.
(Fuente: Bono, 1997)

4.2.3.3. Contracarriles

Elementos colocados a lo largo de los carriles exteriores coincidiendo con la laguna. Como se muestra en la figura 4.11, su función es la de retener las ruedas impidiendo que estas tomen una dirección equivocada, pudiendo provor su descarrilamiento, además de proteger a la punta de corazón de posibles impactos y su consiguiente deterioro. Su dispición en la vía es tal que la distancia entre el carril y el contracarril permita el paso de la pestaña. A esta huella se le denomina *entrecalle*.

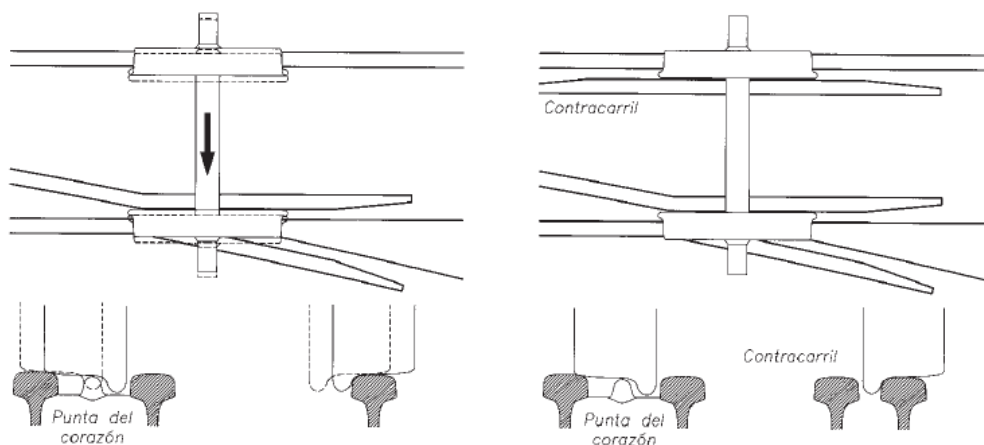


Figura 4.11. Desplazamiento lateral debido a la ausencia del contracarril. (Fuente: Díaz de Villegas, 1995)



Como las patas de liebre, los extremos de los contracarriles tienen una ligera curvatura para evitar ser golpeados directamente y conseguir así una mayor suavidad en la conducción.

Los elementos citados anteriormente conforman los denominados *cruzamientos convencionales*. Existen otros tipos de cruzamientos denominados no convencionales como los *cruzamientos de corazón móvil*. Este tipo de cruzamiento, que se estudiará en capítulos posteriores, consigue la eliminación de la laguna de cruzamiento a través del desplazamiento de la punta del corazón hasta crear un camino de rodadura continuo al acoplarse a la pata de liebre correspondiente.

4.2.4. Partes del desvío: Los carriles de unión

Conforman la parte intermedia del desvío y es la que une el cambio con el cruzamiento. Está conformada por cuatro carriles, dos destinados a la vía directa y dos para la vía desviada.

Es habitual, en ciertas redes ferroviarias, el aprovechamiento de la vía para conducir los sistemas de señalización. Es por ello por lo que en los carriles de unión se instalan aislantes para interrumpir la señal eléctrica en el desvío para evitar falsas lecturas (Amurrio, 2018).

4.2.5. Asiento de los desvíos

Para el asiento de los desvíos, se disponen de traviesas especiales que abarcan la totalidad del aparato, dichas traviesas toman el nombre de cachas si son de madera o metálicas y longrinas si están fabricadas de hormigón. Dichos elementos, como las traviesas, tienen el objetivo de transmitir los esfuerzos, pero también la misión de aumentar la resistencia del propio aparato.

Tradicionalmente, las traviesas de madera han predominado en zonas de aparatos de vía debido a su versatilidad de colocación y adaptación, además de su elasticidad.

Con la aparición de las longrinas de hormigón se continuó utilizando la madera como material predominante en los desvíos dada su mayor versatilidad comparada con las traviesas de hormigón. Un ejemplo son las traviesas tipo RS que, debido a su forma (dos cubos unidos por una riostra) dificultaba la colocación de los carriles de la vía directa y desviada. La combinación dió lugar a singularidades como la línea de alta velocidad París-Lyon, donde coexistían ambos materiales, madera para los aparatos de vía y hormigón para el resto de la vía.

Debido a esta dualidad, se producía un deterioro dispar entre hormigón y madera producido por las propias características del material, además, existía una variación de rigidez en la vía por el paso de traviesas de hormigón a traviesas de madera, que producía una reducción en el confort del pasajero.

Por estos motivos y con el objetivo de tratar de estandarizar nuevos tipos de asiento para unificar las características del conjunto de la vía, se introdujeron las traviesas de hormigón en los



desvíos puesto que, entre otras características, conferían una mayor estabilidad a la vía debido a su mayor peso.

Para el uso de dichas traviesas de hormigón se optó por asentarlas en grava en lugar de balasto. Esta elección tuvo lugar porque la grava, con un diámetro menor que el del balasto, permitía una nivelación más precisa y facilitaba la colocación de las longrinas. La elección de la grava como material granular no prosperó ya que la rigidez de las traviesas provocaba un deterioro acelerado de la grava en comparación con el balasto, material con una resistencia mayor, por lo que se optó finalmente por el uso de este último material.

4.2.6. Sobreancho y peralte

Cabe destacar que, debido al reducido radio de algunas curvas desviadas, esta necesita un sobreancho, establecido con la práctica de cada ferrocarril. Este sobreancho empieza ya en la contraaguja y se obtiene desplazando el carril interior y obtiene su máximo entre el talón y el cruzamiento dándose en este último, un ancho normal. En el caso español, para radios entre 300 y 500 m existe un sobreancho de 10 mm que pasa a ser de 18 mm para radios menores a 200m.

Por lo que se refiere al peralte, este ocasiona ciertas limitaciones ya que las dos vías se encuentran asentadas en las mismas traviesas por lo que, al tener la vía directa su peralte normal, la vía desviada viene condicionada por esta y no tienen el peralte adecuado para la curva de radio correspondiente, provocando un aumento de aceleración centrífuga no compensada.

Para poder suplir esta ausencia de peralte, se consideran los límites de confort del viajero (sobreaceleración e insuficiencia de peralte) para que, sin sobrepasar dichos valores, se adapte la velocidad del vehículo por la vía desviada. En algunas ocasiones, se han conseguido peraltes diferentes mediante el proceso de cajea las traviesas. Esta solución es complicada y no es posible en el caso de traviesas de hormigón.

4.2.7. Tipos de desvíos sencillos según vista en planta

Según la vista en planta de los desvíos simples, se pueden clasificar en diversos tipos. Esta clasificación está directamente ligada a los tipos de cambios existentes ya estos son los que lo definen el trazado del desvío.

Como se ha comentado anteriormente, se estudiarán solo desvíos sencillos. Estos pueden ser rectos o curvos dependiendo de la alineación de la vía principal. En el caso de tener una vía directa rectilínea, se utilizará un desvío recto y por ende el desvío se define como *desvío ordinario*. Si por lo contrario la vía directa es curva, se obtienen varios tipos de desvíos como puede ser: un *desvío convergente*, cuando la desviación es del lado concavo de la curva o un *desvío divergente*, cuando la desviación es del lado convexo de la curva.



Estas categorías se pueden subdividir, en el caso de *desvío convergente*, según si el cruzamiento se encuentra en el carril exterior de la vía desviada y en el interior de la vía directa se denomina *desvío convergente interior*. Si por lo contrario se encuentra en el carril interior de la vía desviada y exterior de la vía directa recibe el nombre de *desvío convergente exterior*. Análogamente para los desvíos convergentes se obtienen los *desvíos convergentes interiores* y *desvíos convergentes exteriores*. En el caso de igualarse las curvas entre vía directa y desviada se obtiene un *desvío simétrico*. En la figura 4.12 se observan los diferentes tipos de desvíos sencillos.

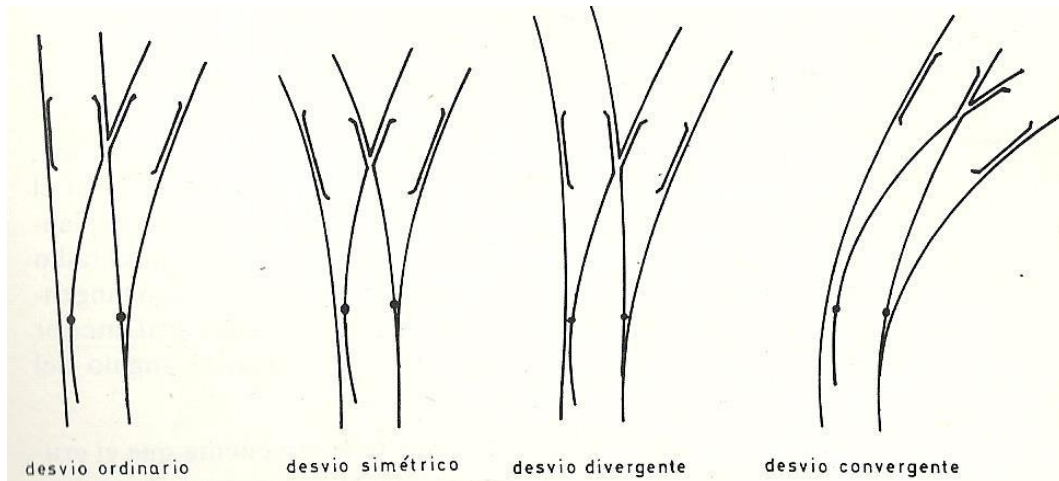


Figura 4.12. Tipos de desvíos sencillos en planta (Fuente: Oliveros, 1977)

4.2.8. Tipos de desvíos convencionales RENFE

RENFE establece diversas categorías de desvíos sencillos dependiendo de su velocidad por vía desviada. Para desvíos convencionales (de 30 km/h hasta 100 km/h) se obtiene, como indica la figura 4.13:

- Tipo A

Este tipo de desvío convencional fue el primer desvío que puso en funcionamiento RENFE en vías generales. Los inconvenientes que suponía eran varios: Por un lado, no podían incorporarse a las líneas con barra larga soldada. Además, era necesario usar juntas y aparatos de dilatación y, por último, la vía desviada era de trazado secante y no tangente. La velocidad de paso por vía directa es de 140 km/h y de 30 km/h por vía desviada.

- Tipo B

Tras el auge de los desvíos de tipo A, surgió la necesidad de desarrollar un nuevo tipo de desvío en colaboración con empresas españolas del sector para modernizar líneas importantes y hacerlas más rápidas. La modificación respecto a los anteriores fue en el corazón del cruzamiento. La velocidad de paso por vía directa es de hasta 160 km/h y de hasta 60 km/h por vía desviada.

- Tipo C



Este tipo de desvío comenzó a instalarse posteriormente a los desvíos de tipo B. Las traviesas de este desvío seguirían siendo de madera (como las anteriores) y dispondrían de un nuevo perfil

bajo asimétrico en la aguja de mayor rigidez transversal. De este modo, se ahorrarían mecanizaciones, ya que la zona a mecanizar es más estrecha que en los anteriores de perfil alto asimétrico. Además, tienen más resistencia lateral, permiten la sujeción elástica interior de la contraaguja, evitan desgastes en la punta de aguja por tener trazado tangente y tienen una mejor sujeción a las traviesas. La velocidad de paso por vía directa es de 200 km/h y de hasta 60 km/h por vía desviada.

Además de estos tres tipos de desvío, existen otros que son muy similares a los de tipo C. Aunque no se va a entrar en detalles de estas pequeñas variaciones, es conveniente nombrar que estos otros desvíos son llamados de tipo P y G. Por otro lado, también existen desvíos en vías de alta velocidad, que serán detallados en el apartado correspondiente de este trabajo.

TIPOS MÁS HABITUALES* DE DESVÍOS CONVENCIONALES						
CARACTERÍSTICAS		TIPO A	TIPO B	TIPO C	TIPO P	TIPO G
GENERALES	Velocidad máxima por vía directa	140 km/h	160 km/h	220 km/h	220 km/h	220 km/h
	Traviesas	Madera	Madera	Madera u Hormigón	Hormigón	Hormigón
	Disposición de traviesas	Perpendicular vía directa y bisectriz del cruzamiento	Semiabanico	Semiabanico	Semiabanico	Semiabanico
	Tipo de sujeción	Rígida	Mixta rígida y elástica indirecta	Elástica indirecta	Elástica indirecta	Elástica indirecta
	Relación con vías adyacentes	Juntas embridadas	Soldable	Soldable	Soldable	Soldable
	Necesita protección de dilataciones	Si	No	No	No	No
ESPECÍFICAS DE CADA ZONA	CAMBIO	Tipo de agujas	Elásticas	Elásticas	Elásticas	Elásticas
		Trazado de aguja	Secante	Tangente	Tangente	Tangente
		Perfil de aguja	Carril especial de alma ancha	Carril especial de alma ancha	Bajo asimétrico	Bajo asimétrico
		Sujeción	Tirafondos	Tirafondos con arandelas Grower	Elástica indirecta	Elástica indirecta
		Dispositivo antides-cuadre	Almohadillas	Almohadillas	Muñón y horquilla	Muñón y horquilla
		Relación aguja talón con vías adyacentes	Juntas embridadas	Soldada	Soldada	Soldada
	CORAZÓN	Tipo	Monobloque acero al Mn	Monobloque acero al Mn	Monobloque acero al Mn	Monobloque acero al Mn
		Relación con vías adyacentes	Embridado	Soldado	Soldado	Soldado
		Sujeción	Tirafondos	Elástica ind.	Elástica ind.	Elástica ind.
	CON-TRACA-RRIL	Perfil	UIC-33	UIC-33	UIC-33	UIC-33
		Relación con el corazón	Acodado al corazón	Palastro al corazón aislado eléctricamente	ninguna	ninguna
		Sujeción del contracarril	Directa a la traviesa	Con soporte único carril-contracarril	Con soporte único carril-contracarril	Con soporte único carril-contracarril
OTRAS		Sujeción del carril	Tirafondos	Clip elastico	Clip elastico	Clip elastico
		Adaptación ancho vía	no	no	transformable ancho Rente /UIC	no
		Traviesa cajón	no	no	si	si
		Resbaladeras de rodillos	no	no	no	si

Figura 4.13. Tipos de desvíos sencillos en plana (Fuente: Amurrio servicios ferroviarios S.A, 2018)



Se obtiene así la nomenclatura expuesta en la especificación técnica ET-033611203 de diciembre de 1998, correspondiente a a figura 4.14:

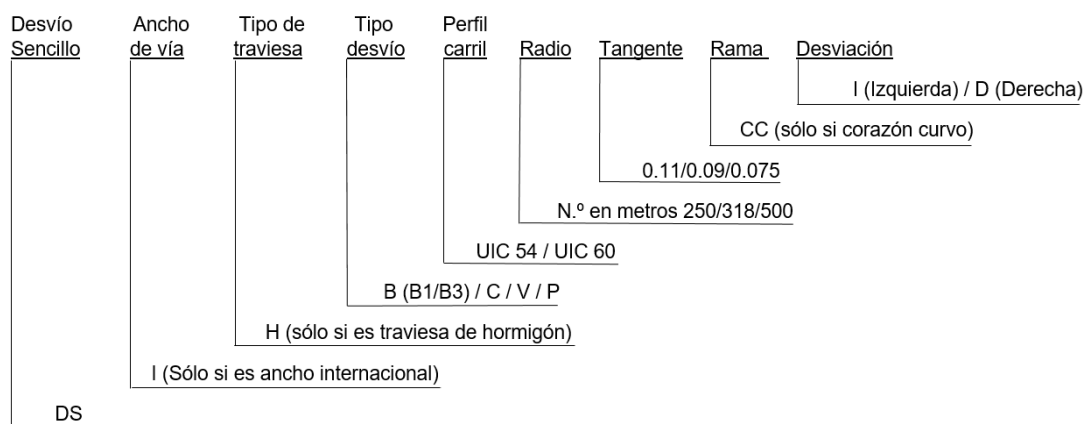


Figura 4.14. Nomenclatura desvíos convencionales (Fuente: Adif, 1998)

4.2.9. Señalización de los aparatos de vía

Otro de los apartados que es conveniente nombrar y desarrollar en este estudio es, sin duda, la señalización de los aparatos de vía. Este aspecto, a veces muy olvidado en el estudio de este ámbito, es de fundamental importancia. Esto es debido a la necesidad del aviso de desvíos.

Según la Orden FOM/2015/2016, de 30 de diciembre, por la que se aprueba el Catálogo Oficial de Señales de Circulación Ferroviaria en la Red Ferroviaria de Interés General (publicada en el BOE de 19 de enero de 2017), hay una serie de señales que son aprobadas para el uso en la red ferroviaria. Concretamente, para los desvíos se propone la siguiente señalización expuesta en la figura 4.15:

ASPECTO	
AÑ	
AO	
AP	
AQ	
Señales R15.	

Figura 4.15. Señalización de desvíos. (Fuente: BOE, 19 de enero de 2017)



Dicha señal tiene el código FI15 según el BOE, es fija indicadora. El fondo se presenta siempre negro y las letras y la orla siempre blancas.

Tal y como se ve en la figura 4.15, existen diferentes modalidades. La opción “AÑ” señala la proximidad de desvío en plena vía, a tomar de talón, a la distancia que se indique. La alternativa “AO” anuncia la proximidad de desvío en plena vía, a tomar de punta, a la distancia indicada. La opción “AP”, significa frenado. Por último, la alternativa “AQ” señala el límite del circuito de vías de agujas.

Por otro lado, también hay que hablar de las señales indicadoras de posición de agujas, véase figura 4.16. Este tipo de indicador tiene el código FI5 según el BOE y se trata de una señal fija luminosa, presentada en un panel rectangular. El fondo es negro y el pictograma es blanco luminoso. Concretamente, la denominación de esta señal es el BOE es “indicadora de comprobación de acoplamiento de agujas”.

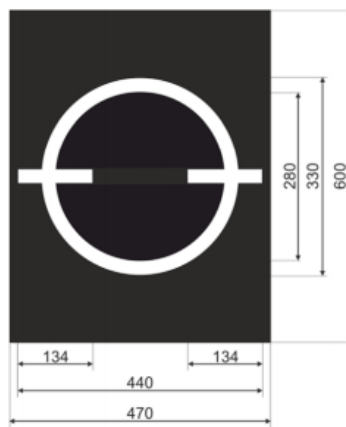


Figura 4.16. Señal indicadora de comprobación de acoplamiento de agujas.

Medidas en mm. (Fuente: BOE, 19 de enero de 2017)

Además de las señales nombradas anteriormente, existen otras que también están relacionadas con los desvíos. Es por ello que también se debe hablar de la señal indicadora de posición de agujas. Se trata de una señal fija, indicadora y luminosa que según el BOE tiene el código FI4 y se presenta en un panel rectangular luminoso. Como las anteriores, el fondo es negro y las inscripciones son luminosas blancas. Su denominación concreta es “indicadora de posición de aguja” y se muestra en la figura 4.17.

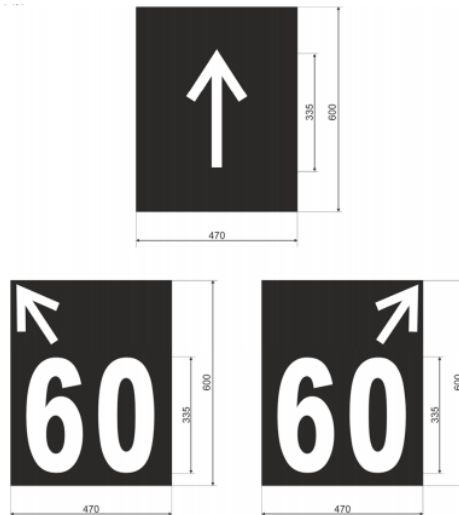


Figura 4.17. Ejemplo de señal de posición de aguja.
Medidas en mm. (Fuente: BOE, 19 de enero de 2017)

4.3. Otros tipos de aparatos de vía

Si bien el presente trabajo se centra en el estudio de los desvíos simples, seguidamente se enumerarán otras tipologías de aparatos de vía y su función.

4.3.1. Desvíos dobles

Debido al reducido espacio que puede haber en las estaciones, es posible que se prefiera agrupar desvíos consecutivos en solo un aparato formado normalmente por dos cambios sencillos y tres cruzamientos.

4.3.2. Travesía

Permite la circulación de una o varias vías a través de otras. Esto es posible debido a que los ejes de estas vías se cortan. Se componen generalmente por uno o la combinación de varios cruzamientos.

Como se ha comentado anteriormente, las travesías suelen componerse por combinaciones de cruzamientos, pero existen otros casos, como el de las *travesías de doble unión* que combinan cruzamientos y elementos de desvíos para permitir la circulación por cuatro direcciones como señala la figura 4.18. Su uso principal es en estaciones ya que son desaconsejables para velocidades superiores a 70 km/h.

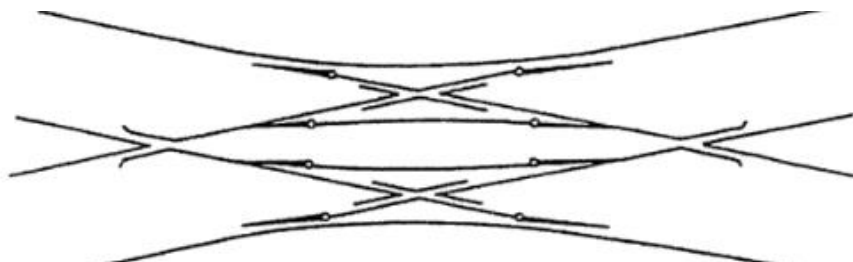


Figura 4.18. Esquema de una travesía de doble unión (Fuente: Oliveros, 2003)



4.3.3. Escape

Permite la circulación entre una vía a otra paralela a la anterior. También es posible el caso que este paso sea recíproco entre las dos vías paralelas formando un doble escape o *bretelle*. Como se verá más adelante, dichos elementos son fundamentales para la explotación de líneas de alta velocidad. La figura 4.19 expone los casos antes mencionados.

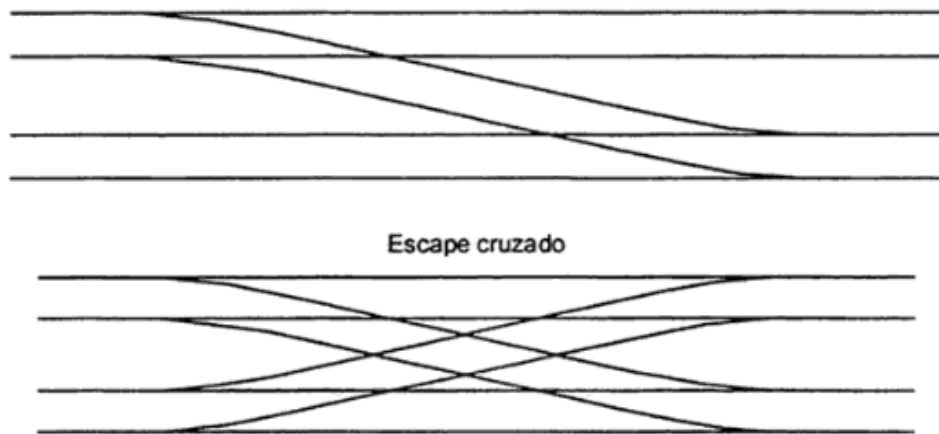


Figura 4.19. Arriba. Esquema de un escape simple. Abajo. Escape cruzado (*bretelle*) (Fuente: Álvarez Mántaras, 2003)

4.3.4. Diagonales

Vías que cruzan diagonalmente un haz de vías, siendo estas generalmente paralelas, usadas en estaciones importantes para formación de trenes, maniobras etc. Esquematisado en la figura 4.20.

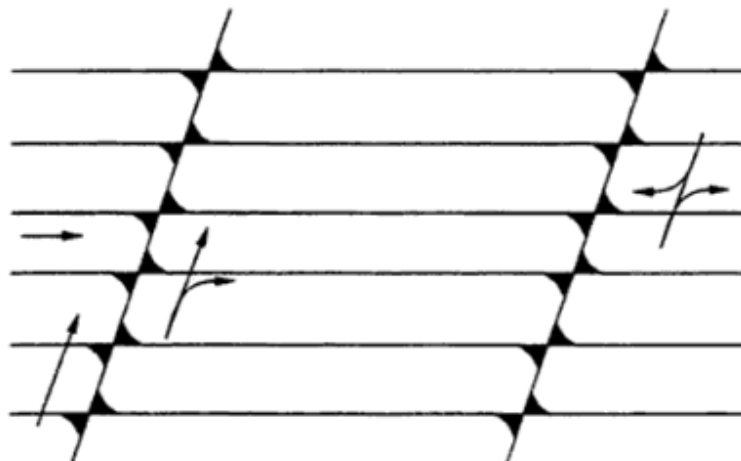


Figura 4.20. Esquema de diagonales cruzando haces de vías. (Fuente: Oliveros, 1977)

4.3.5. Puentes giratorios

Permiten cambiar la orientación de sólo un vehículo cada vez. En desuso ya que las locomotoras actuales disponen de doble cabina de conducción, como esquematiza la figura 4.21.



4.3.6. Lazos y triángulos de vía

Ambos sistemas permiten el giro de 180 grados, haciendo posible en cambio de sentido de los trenes. Cabe destacar que, en comparación con los lazos, los triángulos de vía ocupan menos espacio. Estos están esquematizados en la figura 4.21.

4.3.7. Saltos de carnero

Pasos a distinto nivel. Las limitaciones en la pendiente propias del transporte ferroviario provocan que estos elementos necesiten de una gran ocupación del espacio.

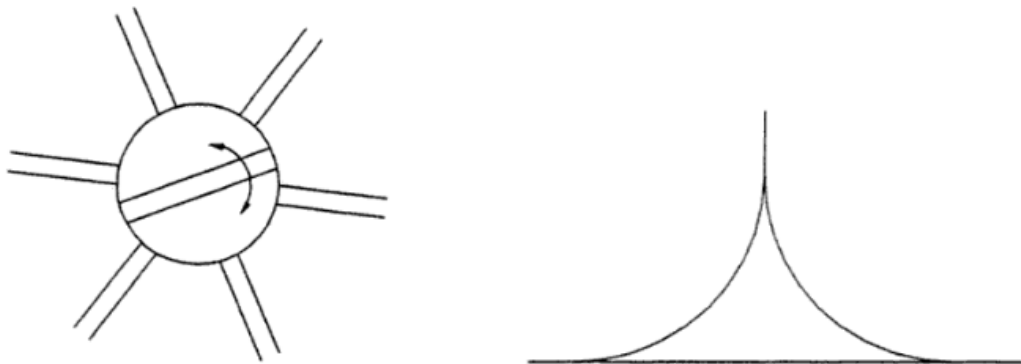


Figura 4.21. Esquema de un puente giratorio (izquierda) y un triángulo de vía (derecha). (Fuente: Álvarez Mántaras, 2003)



5. CRITERIOS DE DISEÑO DE APARATOS DE VÍA CONVENCIONALES

Conocidos ya los diferentes elementos que conforman los aparatos de vía, se procede al análisis de sus criterios de diseño y los parámetros que influyen en estos. Se pretende, en primer lugar, establecer unos parámetros generales y comunes en su diseño para así determinar la ocupación de vía necesaria de estos elementos y, en capítulos posteriores, analizar las variaciones debidas a la evolución tecnológica relacionada con necesidades del ferrocarril.

5.1. Cálculo aproximado de un desvío (trazado teórico de un desvío)

A la hora de definir un desvío, los elementos fundamentales para su definición son, como ejemplifica el esquema de la figura 5.1, la longitud (L), el radio (R) y el ángulo del cruzamiento (α). A modo de ejemplo y para conocer las dimensiones de un desvío, se procede a un cálculo aproximado basado en dicha figura:

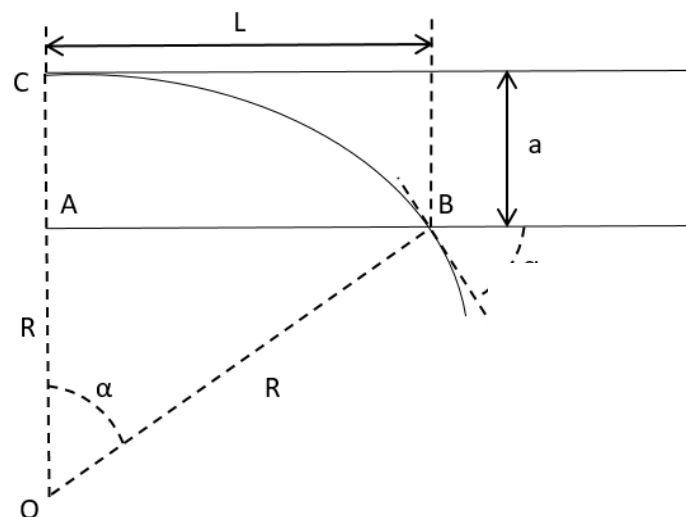


Figura 5.1. Esquema básico desvío. (Fuente: Elaboración propia)

Si se considera que la vía desviada corresponde a una curva de radio constante, R y tangente a la vía directa en el punto C. Se supone también que el cruzamiento es curvo, hipótesis que implica que tanto el corazón y las patas de liebre tienen forma curva.

Sabiendo que:

- El ángulo del cruzamiento depende de la longitud (L) y del radio (R) del desvío.
- La aceleración transversal en el plano de la vía depende del radio de la curva del desvío y sus criterios son análogos a los de una curva del trazado.



Del triángulo \widehat{OAB} se obtiene:

$$R^2 = (R - a)^2 + L^2 \quad (5.1)$$

Del cual:

$$L^2 = 2aR - a^2 \quad (5.2)$$

Despreciando el término a^2 :

$$L^2 \approx 2aR \quad (5.3)$$

Del triángulo \widehat{ABC} :

$$\text{sen} \frac{\alpha}{2} = \frac{a}{L} \quad (5.4)$$

Considerando la aproximación para ángulos pequeños:

$$\text{sen} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}; \text{tg} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2} \quad (5.5)$$

Se obtiene:

$$\text{tg} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{a}{L} \quad (5.6)$$

De las ecuaciones (5.3) y (5.4) resulta:

$$L = \frac{a}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}; R = \frac{a}{2 \text{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} \quad (5.7) \text{ y } (5.8)$$

Por otra parte, considerando como análogos los criterios de trazado referidos a la aceleración transversal en curva a los del desvío se obtiene:

$$\gamma_{sc} = \frac{V^2}{R} - \frac{h}{S}g \quad (5.9)$$

Siendo γ_{sc} la aceleración transversal, el término $\frac{V^2}{R}$ corresponde a la aceleración transversal debida a la velocidad (V) y $\frac{h}{S}g$ a la inclinación del peralte (h) respecto a caso S , que corresponde a la suma del ancho de vía y la cabeza de carril.

Al no existir peralte ($h = 0$) se obtiene:

$$\gamma_{sc} = \frac{V^2}{R} \quad (5.10)$$

Sabiendo que γ_{sc} viene definida a través del *confort del viajero* resulta:

$$V_{desv} = \sqrt{\gamma_{sc} R} \quad (5.11)$$

V_{desv} viene definida por la explotación comercial de la vía por lo que se puede considerar una variable conocida. Si se combinan (5.8) y (5.11):



$$\alpha = 2 \arctg \left(\sqrt{\frac{a \gamma_{sc}}{2}} \frac{1}{V_{desv}} \right) \quad (5.12)$$

Aplicando (3.12) en (3.7):

$$L = \sqrt{\frac{2a}{\gamma_{sc}}} V_{desv} \quad (5.13)$$

Considerando las V_{desv} típicas de los desvíos convencionales, que γ_{sc} es conocida y sus valores oscilan entre 0,4 y 0,6 m/s² (López Pita, 2006), para un ancho de vía $a = 1500$ mm se obtienen unos valores orientativos de los elementos del desvío dispuestos en la tabla 5.1 y las figuras 5.2 y 5.3:

V_{desv} (km/h)	Radio del desvío (m)	Longitud del desvío (m)	Tangente del ángulo del cruzamiento (α)
30	139	25	0,1478
45	313	38	0,0982
60	556	50	0,0736

Tabla 5.1 Parámetros aproximados de un desvío convencional según su velocidad comercial por vía desviada.
(Fuente: elaboración propia)

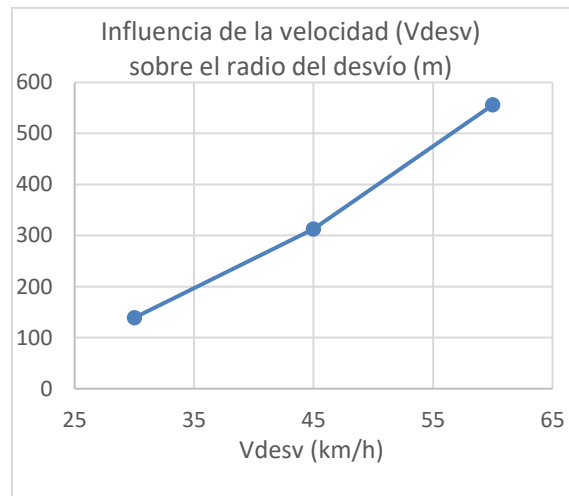


Figura 5.2. Influencia de la velocidad V_{desv} sobre el radio del desvío. (Fuente: Elaboración propia)

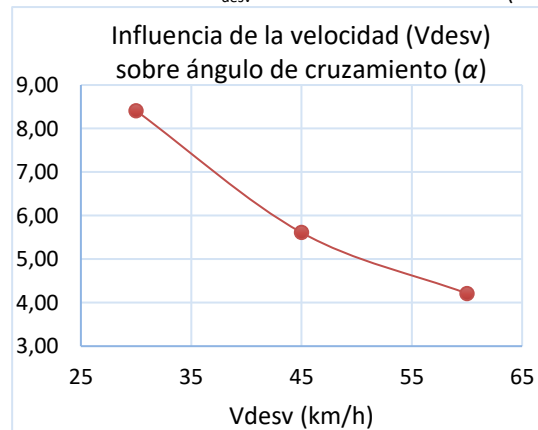


Figura 5.3. Influencia de la velocidad V_{desv} sobre el ángulo de cruzamiento. (Fuente: Elaboración propia)



A partir de la de la aproximación expuesta anteriormente se deduce que la velocidad comercial que se establece para el diseño del desvío influye directamente a los parámetros de este, siendo necesarios radios mayores y ángulos menores produciendo así un aumento de su longitud para pasar de vía directa a desviada y, a modo gráfico, en las figuras 5.2 y 5.3 se muestra dicha dependencia de la velocidad comercial (V_{desv}) sobre el radio (R) y el ángulo del cruzamiento (α) respectivamente.

5.2. Trazado práctico de un desvío

Los cálculos anteriores son, como se ha mencionado, aproximados. En este apartado se propone un cálculo más exacto considerando una aguja de tipo secante como la que se adoptaba en las primeras generaciones de desvíos. Teniendo en cuenta que la obtención de una aguja tangente era difícil de obtener en la época y considerando el reducido espesor de la punta de la misma, esto provocaba un costoso mantenimiento al ser muy frágil frente a los choques de las pestañas. Además, la existencia de un juego (σ) entre la pestaña de la rueda y el borde activo del contracarril provocaba que en un primer tramo la aguja no interviniera en el guiado de la rueda, como se ilustra en la figura 5.5.

Estos factores, sumados a la necesidad de reducir la longitud de las agujas en su parte más frágil, favorecían que el tramo entre la punta real de la aguja y el punto donde dicha aguja interviene en el guiado se pueda considerar recto y tangente a la curva en ese punto, véase figura 5.4. Dicha implicación es admisible ya que no afecta al guiado de los vehículos por tratarse de ángulos reducidos. Dicho espesor varía entre 2 y 6 mm según las administraciones (*Oliveros et.al, 1978*). Cabe destacar que, debido a su evolución, las agujas pasaron a ser tangentes o semitangentes en las generaciones de desvíos posteriores.

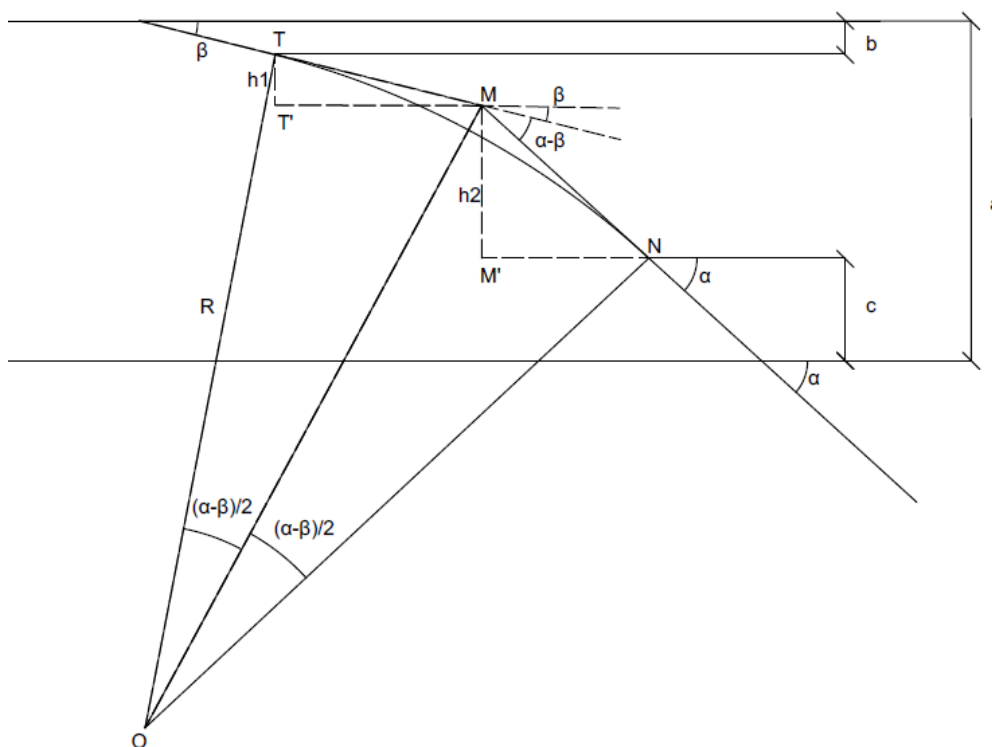


Figura 5.4. Esquema simplificado de un desvío. (Fuente: Elaboración propia)

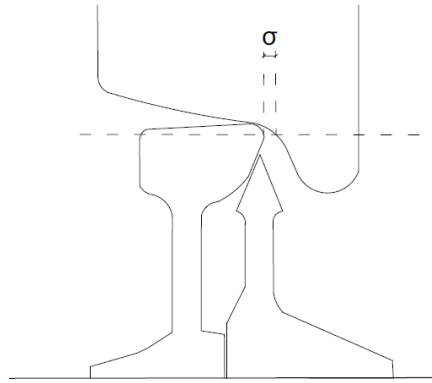


Figura 5.5. Detalle entre pestaña y punta real de la aguja. (Fuente: Elaboración propia)

En el caso del cruzamiento, este puede ser recto o curvo, en el primer caso el punto de tangencia se encuentra en el principio del cruzamiento o por su defecto en su tramo recto mientras que en el segundo se encuentra en el principio del cruzamiento.

Siendo α el ángulo del cruzamiento, β el ángulo de desviación del cambio, a el ancho de vía y b y c los tramos rectos del cambio y cruzamiento correspondiente se obtiene:

Del triángulo \widehat{OTM} :

$$R = \frac{\overline{TM}}{tg \frac{\alpha - \beta}{2}} \quad (5.14)$$

Análogamente, de los triángulos $\widehat{TMT'}$ y $\widehat{MNM'}$:

$$h_1 = \overline{TM} \sen \beta; h_2 = \overline{MN} \sen \alpha \quad (5.15)$$

De la figura 5.4:

$$a - (b + c) = h_1 + h_2 = \overline{TM} \sen \beta + \overline{MN} \sen \alpha \quad (5.16)$$

Como $\overline{TM} = \overline{MN}$:

$$a - (b + c) = \overline{TM} \sen \beta + \overline{MN} \sen \alpha = \overline{TM} (\sen \alpha + \sen \beta) \quad (5.17)$$

Substituyendo el término \overline{TM} en (3.14):

$$R = \frac{\overline{TM}}{tg \frac{\alpha - \beta}{2}} = \frac{a - (b + c)}{tg \frac{\alpha - \beta}{2} (\sen \alpha + \sen \beta)} \quad (5.18)$$



Simplificando y utilizando las identidades trigonométricas⁽²⁾ se obtiene:

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{a - (b + c)}{\operatorname{tg} \frac{\alpha - \beta}{2} (\operatorname{sen} \alpha + \operatorname{sen} \beta)} \\
 R &= \frac{a - (b + c)}{\frac{\operatorname{sen} \frac{\alpha - \beta}{2}}{\cos \frac{\alpha - \beta}{2}} 2 \operatorname{sen} \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}} \\
 R &= \frac{a - (b + c)}{2 \operatorname{sen} \frac{\alpha - \beta}{2} \operatorname{sen} \frac{\alpha + \beta}{2}} \\
 R &= \frac{(b + c) - a}{\cos \beta - \cos \alpha} \quad (5.19)
 \end{aligned}$$

$$^{(2)} \cos \alpha - \cos \beta = -2 \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right)$$

$$^{(2)} \operatorname{sen} \alpha + \operatorname{sen} \beta = 2 \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right)$$

5.3. Esfuerzos y estudio cinemático y dinámico de la entrada en un desvío

Debido a las irregularidades presentes en la vía se producen acciones dinámicas en la circulación de los vehículos sobre los desvíos, estos esfuerzos son análogos al paso por curva.

Estas acciones se agravan con el aumento de la velocidad y con un deficiente mantenimiento de la vía. Tratándose los desvíos de puntos singulares en la vía, debido a la existencia de piezas móviles como las agujas, con una resistencia menor a la de otros elementos de la vía.

Además de los esfuerzos antes mencionados, es necesario hacer referencia a los esfuerzos propios de un desvío, es decir, los que se producen debido a la discontinuidad del trazado en la laguna de cruzamiento, la inexistencia de curva de transición en la entrada del cambio o los producidos por la posible inexistencia de peralte (en el caso de un desvío recto).

5.3.1. Esfuerzos transversales

El movimiento longitudinal del vehículo viene acompañado por movimientos transversales como el movimiento de lazo, ilustrado en la figura 5.6, que da lugar al choque de la pestaña contra el carril, produciendo un esfuerzo transversal sobre la vía. Dicho movimiento transversal viene acompañado de un desplazamiento angular con eje el centro del vehículo.

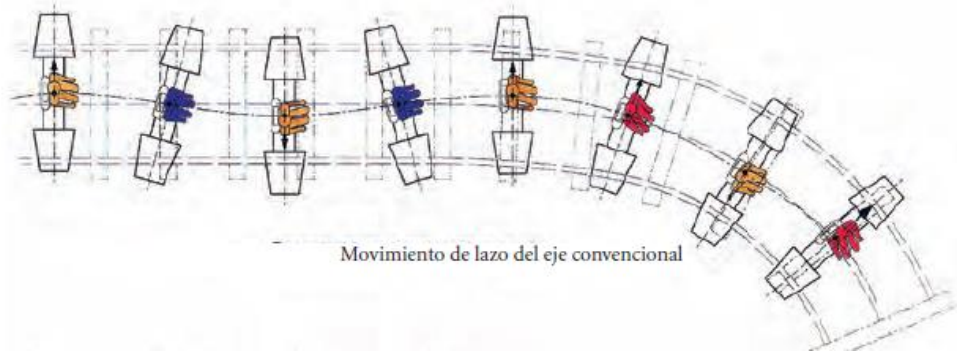


Figura 5.6. Movimiento de lazo. (Fuente: López Pita, 2006)

5.3.1.1. Esfuerzos producidos por las ruedas

Los esfuerzos producidos por las ruedas son los que intervienen, entre otros aspectos, al descarrilamiento de la vía. Considerando el caso más desfavorable, la circulación en curva, se obtiene (Oliveros *et.al*, 1978) la condición de descarrilamiento siguiente:

$$\frac{Y}{Q} \leq A$$

Siendo Q la carga por rueda e Y el esfuerzo transversal ejercido por esta que se muestran en la figura 5.7.

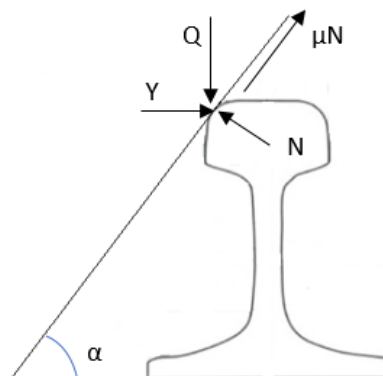


Figura 5.7. Esquema de esfuerzos en al interacción rueda-carril. (Fuente: Oliveros, 1978)

Correspondiente al caso donde la pestaña desliza e intenta remontar el carril. Si se considera el factor tiempo y la influencia de este en el descarrilamiento se obtiene:

$$\frac{Y}{Q} = 0,04 \frac{1}{t} \text{ si } t \leq 0,05 \text{ segundos}$$

$$\frac{Y}{Q} = 0,8 \text{ si } t > 0,05 \text{ segundos}$$



5.3.1.2. Esfuerzos producidos por los ejes

Los esfuerzos producidos por los ejes producen el ripado de la vía, es decir, el movimiento lateral de la vía. Considerando otra vez el caso más desfavorable, la circulación en curva, dicho movimiento se cuantifica a través de los esfuerzos H ejercidos por el eje. Se diferencian dos términos dentro de este esfuerzo, el primero, H_1 relativo a la aceleración centrífuga no compensada y un segundo, H_2 relacionado al peso por eje del vehículo y a la velocidad (Fórmula de Prud'homme):

$$H = H_1 + H_2 = \alpha \left(\frac{PV^2}{127R} - \frac{Ph}{s} \right) + \frac{PV}{1000} \quad (5.21)$$

Donde:

P = Peso por eje (T)

V = Velocidad (km/h)

R = Radio de la curva (m)

h = peralte de la vía (mm)

s = Distancia entre ejes de cabezas de carriles (mm)

α = Factor de mayoración debido a la distribución de la aceleración no compensada

5.3.2. Esfuerzos longitudinales

Considerando los esfuerzos debido al vehículo y asimilando el eje ferroviario como un bicono, la marcha longitudinal del aparato causa el rozamiento de la llanta sobre el carril, el rozamiento de las pestañas cuando entran en contacto con el carril y esfuerzos de tracción y compresión debido a la puesta en marcha y frenado de los vehículos.

Por otro lado, la temperatura produce una dilatación o contracción en el carril, si se impide esta posible dilatación o contracción se formarán compresiones o tracciones respectivamente. Considerando un carril rectilíneo sometido a compresiones internas debidas a la dilatación impedida producida por una diferencia de temperaturas, este pandearía elásticamente una vez el metal alcanzara su límite elástico. En el caso de producirse una deformación inicial por causas externas y si la energía de compresión es mayor a la resistencia del material, esta tendería a disiparse participando en dicha deformación, produciendo así el pandeo del carril.

5.3.3. Estudio cinemático y dinámico en la entrada de un desvío

Debido a la complejidad del estudio, es necesario el establecimiento de diversas hipótesis (Oliveros, 1978):

Suponemos el caso de la entrada del último bogie del convoy ya que es el caso más desfavorable. Se supone que el centro del enganche del vehículo precedente sigue el trazado teórico de la desviación.



Respecto al eje, se considera:

- φ , ángulo de ataque real cuando la rueda aborda la punta de la aguja
- ω , ángulo de orientación de la rueda
- β , ángulo de desviación
- α_o , ángulo debido a la curvatura de la aguja entre la punta matemática P y el punto de impacto P_1

Se considera el movimiento del pivote del bogie idéntico al del eje estudiado ya que la longitud de onda del movimiento de lazo es mucho mayor al empate.

Respecto a la parte suspendida:

Aunque el movimiento de lazo de caja y bogie no coinciden, se admiten como idénticos el movimiento de lazo secundario de la caja y el bogie.

Respecto al centro de enganche del vehículo:

- La deformación transversal de la vía, eje y bastidor del bogie tiene lugar en el lado de la rueda de ataque, es decir, la que impacta contra la aguja.
- Las deformaciones producidas son elásticas.
- No se considera serpienteo de las agujas.

Dichas consideraciones generan tres incógnitas:

- 1. Deformación transversal acumulada de la vía, eje y bastidor del bogie e implica un desplazamiento transversal del pivote del bogie
- 2. Desplazamiento transversal del centro de rotación de la caja
- 3. Oscilación por balanceo de la caja

Considerando el equilibrio (Comité ORE D-72):

$$ma^2 \frac{\ddot{\eta}_1 - \ddot{\eta}_2}{2a} + m\ddot{\eta}_2 + 2ac_y e_{11} + ac_k \left[\frac{\eta_1 + \eta_2}{2} - \left(\eta' + \frac{\eta_{1(0)} + \eta_{2(0)}}{2} \right) \right] + ak_2 \left(\frac{\dot{\eta}_1}{2} + \frac{\dot{\eta}_2}{2} - \dot{\eta}' \right) = 0 \quad (5.22)$$

$$\frac{4}{3} m' a'^2 \frac{\ddot{\eta}' - \ddot{\eta}_u}{a'_u} + m' \ddot{\eta}_u a' + c_k a'_u \left(\eta' + \frac{\eta_{1(0)} + \eta_{2(0)}}{2} - \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} \right) + k_2 a'_u \left(\dot{\eta}' - \frac{\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2}{2} \right) + m' \ddot{\phi}' h' a' = 0 \quad (5.23)$$

$$(I'_x + m' h'^2) \ddot{\phi}' + m' \left(\dot{\eta}' \frac{a'}{a'_u} + \ddot{\eta}_u \frac{a'_u - a'}{a'_u} \right) h' + 2c_f b_1^2 \phi' + 2k_3 b_2^2 \dot{\phi}' - m' g h' \phi' = 0 \quad (5.24)$$



Donde:

m = masa del bogie trasero

m' = masa de la caja del vehículo

$2a$ = distancia entre los ejes de un bogie

$2a'$ = distancia entre topes del vehículo

a'_u = distancia entre pivote de un bogie y topes correspondientes al bogie opuesto

η = desplazamiento de un pnto en la dirección del eje η

η' = desplazamiento transversal del pivote de la caja

ϕ = ángulo de balanceo

c_y = constante elástica de los resortes de guiado

c_k = constante elástica de los resortes de acoplamiento

e_{11} = deformación transversal acumulada de vía, eje y chasis del bogie

k = coeficiente de amortiguamiento

h' = distancia vertical entre los ejes montados y el plano xy

b = distancia transversal de un punto del vehículo con relación al eje ox

I'_x = momento de inercia de la parte suspendida respecto eje ox

c_f = constante elástica de los resortes de suspensión

La figura 5.8 esquematiza los parámetros antes definidos.

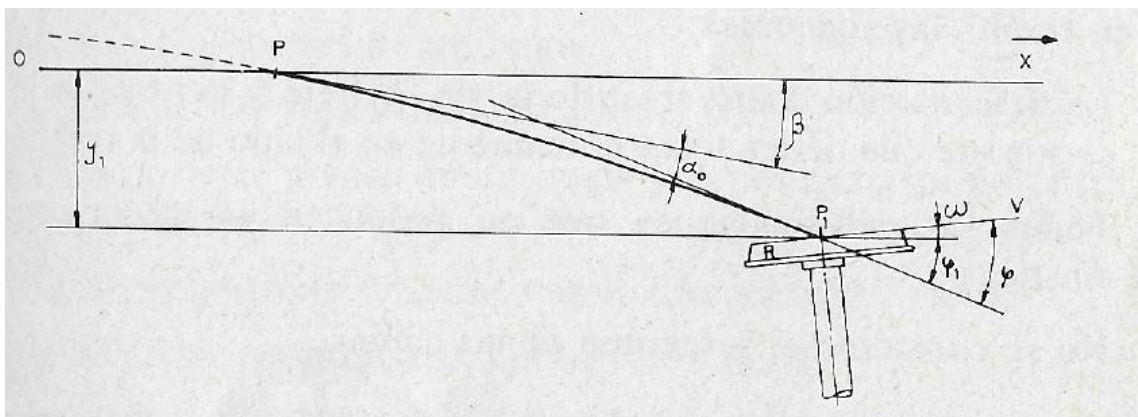


Figura 5.8. Esquema para el estudio cinemático y dinámico. (Fuente: Oliveros, 1978)

Los valores de las incógnitas se obtienen a partir de los intervalos de tiempo entre 0 y 0,3 segundos, es decir, el tiempo de entrada de los vehículos en la desviación.



A partir de la obtención de datos de diversos vehículos y tipos de desviaciones se han podido obtener las fórmulas empíricas siguientes:

$$e_{11max} \approx v(\beta + \alpha_0 + \omega)\epsilon_1 = v\varphi\epsilon_1 \quad (3.22)$$

$$\ddot{e}_{11max} \approx v(\beta + \alpha_0 + \omega)\epsilon_2 = v\varphi\epsilon_2 \quad (3.23)$$

$$\ddot{\eta}'_{max} \approx c_1 \frac{v^2}{R} + c_2 v \left[(\omega + \beta) \left(1 - \frac{e^{-c_3 v}}{2} \right) + \frac{\alpha_0}{2} \right] \quad (3.24)$$

Siendo ϵ_1 , ϵ_2 , c_1 , c_2 y c_3 parámetros constantes que dependen de la tipología de vía y vehículo.

Nótese que tanto la amplitud transversal e_{11max} como la aceleración transversal \ddot{e}_{11max} son directamente proporcionales a la velocidad transversal, que corresponde a la velocidad del vehículo por el ángulo de ataque real.

En cambio, se puede apreciar que la reducción tanto del ángulo de desviación, β como del ángulo de orientación de la rueda, ω conllevarían a una reducción de la aceleración transversal $\ddot{\eta}'_{max}$. La reducción del ángulo de desviación es posible siempre y cuando la resistencia de la punta de la aguja sea compatible mínimos requeridos, por otra parte, la reducción del ángulo de ataque viene propiciado por la disminución en el juego de los ejes del vehículo.

5.4. Cálculo de la entrecalle y la laguna de cruzamiento

5.4.1. Entrecalle carril-contracarril

Como se ha dispuesto en el capítulo anterior, es necesario un espacio entre el carril y el contracarril, llamado entrecalle, para permitir el paso de la pestaña de la rueda y garantizar que esta no choque con la punta del corazón y no se tome una falsa dirección. Dicha entrecalle se puede observar en la figura 5.9.

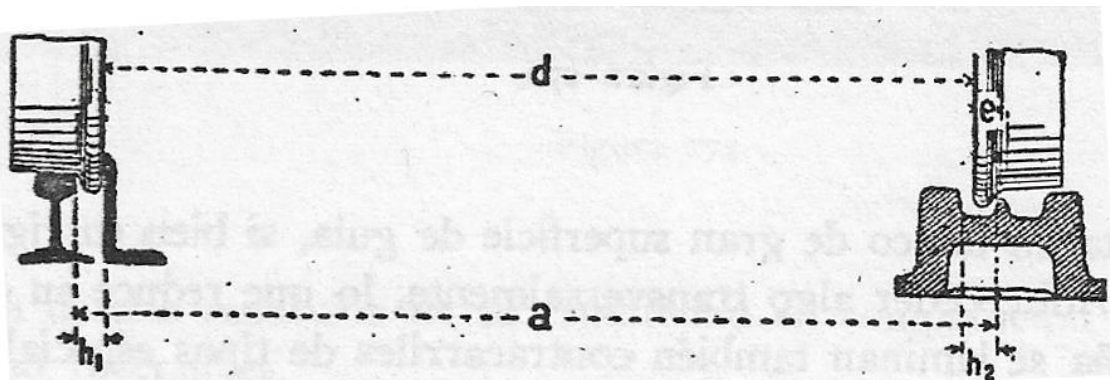


Figura 5.9. Distancia entre ruedas al paso por el corazón. (Fuente: García Lomas, 1972)

Como se muestra en la figura 5.9, se define:

- h_1 y h_2 : Espacio entre carril-contracarril y entre punta de corazón- pata de liebre respectivamente



- d : Distancia entre planos interiores de las ruedas
- e : Espesor de la pestaña
- a : Ancho de vía

Se obtiene:

$$a - h_1 \geq (d - 2e) - e \quad (5.25)$$

Aislando:

$$h_1 \leq a - (d + e) \quad (5.26)$$

El termino $(d + e)$ es el que restringe el valor de la huella h_1 por lo que se establece la *cota mínima de protección de la punta m*:

$$m = d + e \quad (5.27)$$

Por otra parte:

$$a - (h_1 + h_2) < d \quad (5.28)$$

Observando la figura 5.9 y a partir de la ecuación (5.16) resulta:

$$m + h_1 = a \quad (5.29)$$

Combimando (5.17) y (5.18) se obtiene:

$$\begin{aligned} m + h_1 - (h_1 + h_2) &< d \\ m - h_2 &< d \\ h_2 &< m - d \end{aligned} \quad (5.30)$$

Para ancho de vía internacional el valor de la *cota mínima de protección* corresponde a $m = 1,3955 m$ y h_1 oscila generalmente entre 40 y 45mm (García Lomas, 1972).

Nótese que el entrecalle h_2 es independiente del ancho de vía y como en el caso de h_1 oscila entre 40 y 45mm.

5.4.2. Entrecalle aguja-contraaguja

Análogamente para la entrecalle del cambio, es necesario que la distancia entre aguja y contraaguja tenga un valor mínimo. Esta huella se obtiene a partir del movimiento de la aguja y la carrera de esta está directamente relacionada con la longitud y flexibilidad de la aguja.

Como se recoge en la especificación técnica 03.361.120.3, “Para asegurar paso de la pestaña de la rueda a lo largo del cambio, el valor de la entrecalle entre la aguja y la contraaguja, en posición de no acopladas, deberá ser siempre superior a 58 mm. No se aceptará tolerancia alguna en esta magnitud”.



5.4.3. Laguna

Es necesario disponer de este espacio para permitir el paso de la rueda por la discontinuidad producida debido al corazón como sistetiza la figura 5.10

Considerando como e_1 el espesor de la punta real y a partir de la figura 5.10 se deduce:

$$l_c = \overline{BP} + \overline{P_1P} = \frac{h_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{e_1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{(h_2 + e_1)}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (5.31)$$

La ecuación (5.31) demuestra que la reducción del ángulo del cruzamiento produce un aumento de la laguna, en cambio, interesa que h_2 se reduzca lo máximo posible para así reducir dicha laguna y aumentar la superficie de rodadura entre la punta de corazón y la pata de liebre y está limitada por la ecuación (5.30).

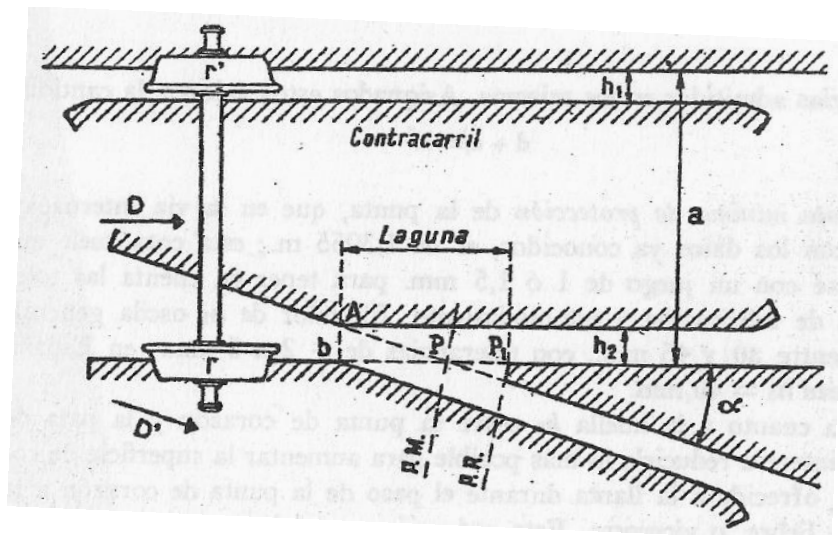


Figura 5.10. Esquema de un cruzamiento recto. (Fuente: García Lomas, 1972)



6. APARATOS DE VÍA PARA ALTA VELOCIDAD

6.1. Introducción

La aparición de líneas de alta velocidad supuso un punto de inflexión en la explotación comercial del ferrocarril. Su exigencia por mantener unos elevados estándares de calidad y servicio, como pueden ser la puntualidad de los trenes, la reducción del tiempo de trayecto respecto a las líneas convencionales o el confort de los pasajeros comportan que todos los elementos que conforman dichas líneas deban mantener unas altas prestaciones al menor coste posible.

La necesidad de alcanzar dichas prestaciones repercute directamente en los elementos de la vía, que han sufrido una importante evolución. No es de extrañar pues, que los aparatos de vía, siendo una parte singular y fundamental de la explotación ferroviaria, hayan sufrido cambios relevantes para mantener los estándares de calidad propios de esta reciente necesidad.

Si se consideran los aparatos de vía propios de las líneas convencionales estudiados en el capítulo cuarto, se desprende que la velocidad por vía desviada no supera los 60 km/h. Dicha velocidad es aceptable considerando una velocidad por vía directa menor a 200km/h pero en el caso de la alta velocidad, con velocidades de circulación superiores a 250km/h, rinden ineficaz los aparatos de vía clásicos para su uso en líneas de alta velocidad y es por ello que las principales administraciones ferroviarias desarrollaran desvíos que permiten velocidades por vía desviada de 100 hasta 220 km/h. A modo de ejemplo (López Pita, 2010), considerando un caso práctico en el que por razones de mantenimiento imprevistas y urgentes sea necesaria la circulación de trenes en ambas direcciones (banalización de vías), la existencia de un aparato de vía convencional, apto para circulación por vía desviada a 30 o 60 km/h, produciría un retraso mayor a cinco minutos, tiempo superior al límite aceptado en algunas líneas como por ejemplo la línea Madrid-Sevilla. Por otra parte, el uso de desvíos aptos para alta velocidad, que permiten una velocidad por vía desviada de 100 km/h producirían un retraso de tres minutos, véase figura 6.1.

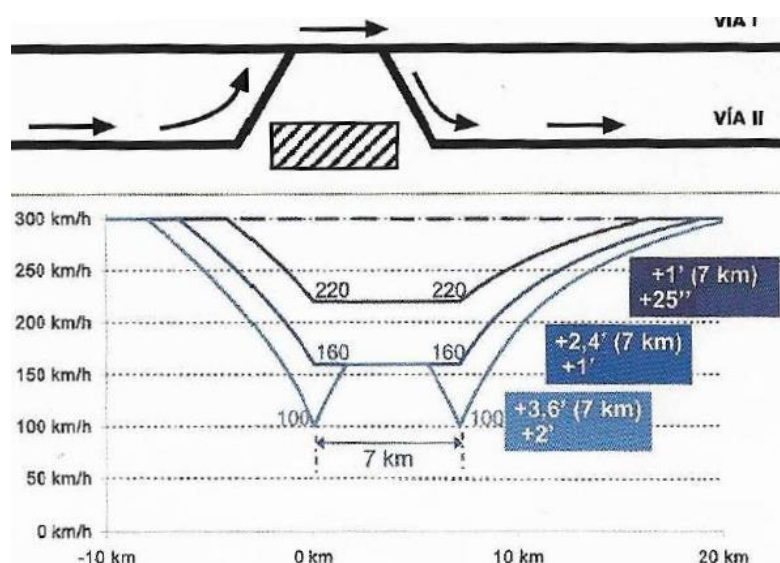


Figura 6.1 Variación de la pérdida de tiempo según la velocidad por vía desviada. (Fuente: López Pita, 2010)



6.2. Problemáticas de los aparatos de vía convencionales para su uso en alta velocidad

Como se ha podido comprobar, fue necesario el desarrollo de nuevos tipos de desvíos que permitieran velocidades mayores por vía desviada para cumplir así con los criterios antes comentados, debido a que la disposición típica de los desvíos convencionales, como se verá a continuación, no se podía adaptar a la alta velocidad.

6.2.1. Ángulo de cruzamiento

Considerando el aumento de velocidad citado anteriormente y considerando lo expuesto en capítulos anteriores, el aumento de la velocidad produce en el mismo desvío un aumento considerable en el radio, la longitud de las agujas y una disminución del ángulo de cruzamiento α (véase capítulo quinto).

Dicho aumento del ángulo de cruzamiento está directamente ligado a la longitud de la laguna del cruzamiento y de la entrecalle entre corazón y pata de liebre. Para velocidades menores a 200 km/h por vía directa, la existencia de esta discontinuidad no conformaba un problema mayor.

El aumento de la velocidad comercial produce pues, una mayor perturbación en la continuidad de la rodadura. Dicha discontinuidad provoca un desplazamiento lateral que es absorbido por el contracarril, pero genera sollicitaciones dinámicas que se transmiten en forma de aceleración transversal no compensada en el vehículo, afectando así al confort del viajero.

Se deduce pues, la ineficacia de este sistema ya que se demuestra que la longitud de la laguna se convierte en excesiva en cuanto a seguridad de los vehículos se refiere, añadiendo una reducción de vida útil de los elementos del desvío, que, debido al aumento de esfuerzos relativos al aumento de la laguna, obligan a los administradores ferroviarios a realizar operaciones de mantenimiento con mayor frecuencia. Es por ello que se precisan pues nuevos elementos que eliminen la laguna del cruzamiento y reduzcan la aceleración no compensada por el contracarril, como corazones de punta móvil.

A modo de ejemplo y considerando la ecuación (5.31), donde el espesor e_1 se puede considerar de aproximadamente 40 mm se obtienen los valores de la tabla 6.1:

$$l_c = \frac{h_2 + e_1}{\operatorname{tg} \alpha}$$

<i>Vdesv</i> (km/h)	<i>ángulo del</i> <i>cruzamiento alfa</i>	<i>Longitud de la</i> <i>laguna (mm)</i>
30	0,15	271
45	0,10	407
60	0,07	544
100	0,04	907

Tabla 6.1. Evolución de la longitud de la laguna según el ángulo de cruzamiento. (Fuente: Elaboración propia)



6.2.2. Aceleración transversal

Tradicionalmente, el criterio de diseño empleado para desvíos convencionales establecía el uso de curvas circulares. Dicha disposición, como en el caso del cruzamiento, aun considerando la ausencia de peralte, no producía mayores problemas debido a la velocidad de circulación propia de líneas convencionales pero el aumento de velocidad propio de la alta velocidad produce nuevamente la necesidad de establecer nuevos criterios de diseño para reducir el valor de la aceleración transversal sin compensar, como es la incorporación en el trazado de los aparatos de vía de curvas de transición, en este caso de clotoides.

6.3. Desvíos sobre balasto

Vista la problemática patente en la implementación de los desvíos convencionales en líneas de alta velocidad, resulta conveniente analizar las diferentes partes de un desvío para destacar su evolución. Nótese que el caso de los carriles de unión se tratará en los criterios de diseño, donde se analizará el trazado del desvío.

6.3.1. Cambio

6.3.1.1. Inclinación

Como se ha expuesto anteriormente, el cambio es la primera parte del desvío y es el encargado de dirigir el vehículo por vía directa o desviada.

Normalmente, en líneas convencionales, los elementos del cambio se disponían de forma vertical. Dicha disposición era posible dada la velocidad propia de estas líneas ya que, alcanzada una cierta velocidad definida como *velocidad crítica*, el sistema de guiado deviene inestable y genera en el vehículo inestabilidad lateral produciendo movimientos transversales ondulatorios y posiblemente el descarrilamiento.

A modo de ejemplo, considerando material rodante con una velocidad máxima de 200 km/h se obtiene para cambios verticales, una velocidad crítica de 280 km/h, compatible con aparatos de vía convencional. Por otra parte, considerando velocidades en alta velocidad de 300 km/h y superiores, se comprueba que la posición vertical de los carriles no puede ser una solución segura en el caso de cambios para alta velocidad.

Se ha comprobado que el valor de la velocidad crítica, para un mismo modelo de vehículo, disminuye considerablemente en presencia de carriles verticales por lo que, para cambios de alta velocidad se ha optado por una inclinación de las agujas de 1/20 o 1/40 respecto al plano vertical.

Nótese que la inclinación de la contraaguja es relativamente fácil desde un punto de vista de puesta en obra, pero el caso de las agujas resulta más complejo debido a que estas se desplazan sobre placas de resbalamiento horizontales. A modo indicativo, la figura 6.2 representa la



solución adoptada en líneas TGV y en la línea de AV Roma-Napoli, consistente en inclinar solamente la cabeza del carril mientras se mantiene vertical tanto el patín como el alma.

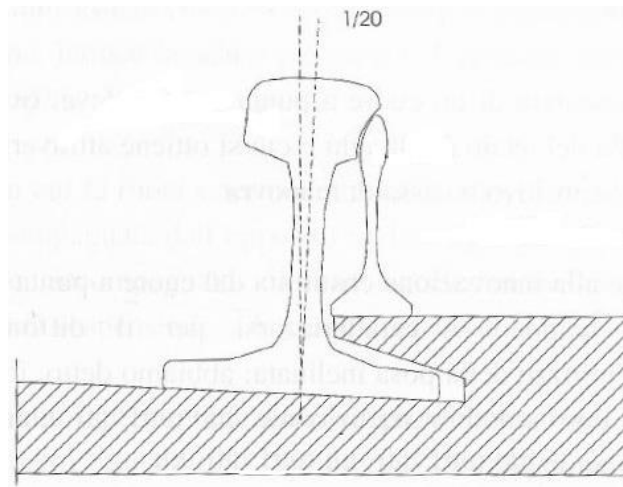


Figura 6.2 Inclinación de aguja y contraaguja. (Fuente: Bono, 1997)

6.3.1.2. Perfil de las agujas

En el caso de las agujas curvas propias dentro de alta velocidad, estas favorecen el paso por vía debido a su menor ángulo de ataque respecto a las agujas rectas. En contrapartida, dichos elementos no son intercambiables entre desvíos de izquierdas o derechas y en añadidura su precio es mayor debido a la dificultad en su fabricación.

Dentro de esta tipología de aguja se pueden distinguir (véase las figuras 6.3 a 6.7):

- Agujas tangentes:

La punta matemática es tangente al contracarril en su origen pero a la práctica la punta real está retrasada hasta que dicha aguja tenga un espesor de 5 mm. Dicha tipología requiere agujas de mayor longitud y posee una zona de baja resistencia.

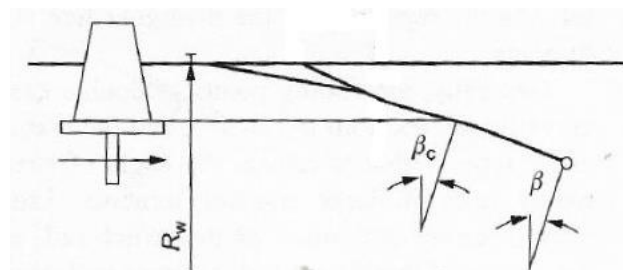


Figura 6.3 Esquema aguja tangente. (Fuente: Wang, 2015)

- Agujas semitangentes:

Dichas agujas también son tangentes al contracarril pero con la particularidad que, llegado a un espesor menor de 40mm, continúe recta hasta el contracarril.



Existe la posibilidad que el punto de tangencia se encuentre en una recta paralela al contracarril, y como en el caso anterior, se utilice una recta para unir la aguja con el contracarril. En este caso, su ángulo de ataque es mayor pero a su vez se aumenta su resistencia.

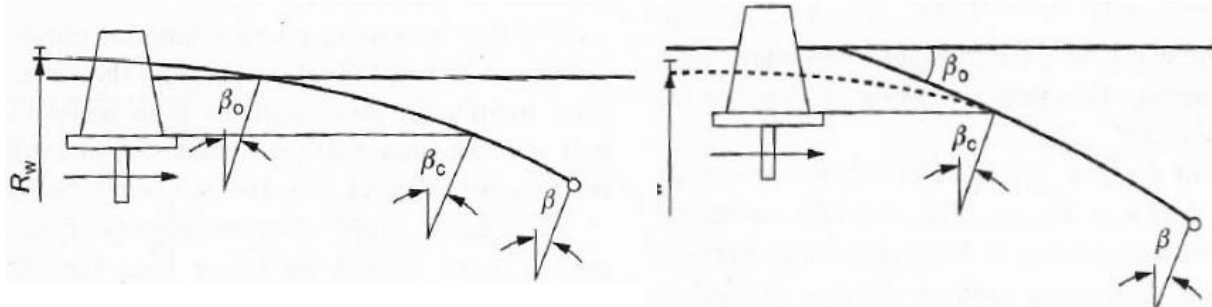


Figura 6.4 y Figura 6.5 Esquema agujas semitangentes. (Fuente: Wang, 2015)

- Agujas secantes:

En el caso de las agujas secantes, la punta matemática es tangente a una recta paralela al contracarril trazada fuera de los carriles.

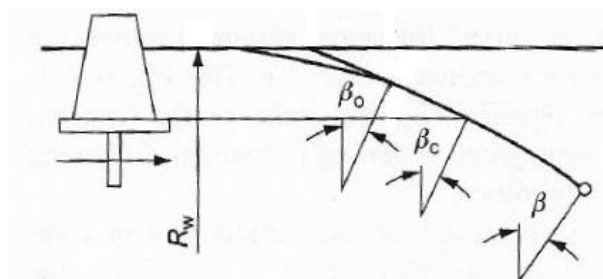


Figura 6.6 Esquema aguja secante. (Fuente: Wang, 2015)

- Agujas semisecantes:

Por el contrario, estas agujas mantienen relación con las agujas semitangentes pero con la diferencia que el punto de tangencia se encuentra fuera del ancho de la vía. Con esta disposición se consiguen agujas de corto recorrido longitudinal.

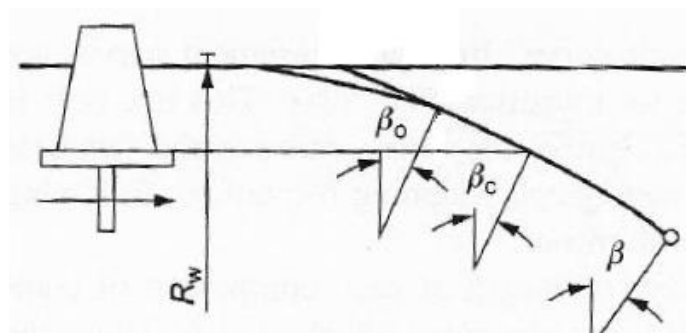


Figura 6.7 Esquema aguja semisecante. (Fuente: Wang, 2015)

La elección del perfil de aguja viene determinado por diversos factores como pueden ser la resistencia de la aguja, la suavidad en el paso de la rueda por esta, su mantenimiento y las



dimensiones del desvío. En el caso de no tener limitaciones en el diseño del desvío, es recomendable el uso de agujas semi tangentes (Wang, 2015).

6.3.1.3 Optimización de la marcha

Aunque los perfiles de aguja de alta velocidad reducen el ángulo de ataque, para radios mayores a 1200 m, debido a la que los ejes y las ruedas de los vehículos son solidarios y unidireccionales, en la entrada del desvío la pestaña que circula por el conjunto aguja-contraaguja entre en contacto con la punta de la aguja hasta el punto donde dicha aguja sea capaz de soportar las cargas transmitidas por la rueda, provocando un desgaste la pieza y reduciendo el confort de la marcha.

La optimización cinemática de la marcha permitió implementar un sobreancho progresivo y localizado en los contracarriles logrando así que el espesor de las agujas fuera mayor y consiguiendo una reducción de su desgaste ya que el punto crítico en el que la aguja soporta las cargas verticales se encuentra adelantado. Este sistema viene comúnmente llamado sistema FAKOP (*Fahrkanten Optimierung*) y se ilustra en la figura 6.8.

Para reducir aún más el espesor de la aguja sin que pierda resistencia, se somete a un proceso de perlitizado en la punta de la aguja.

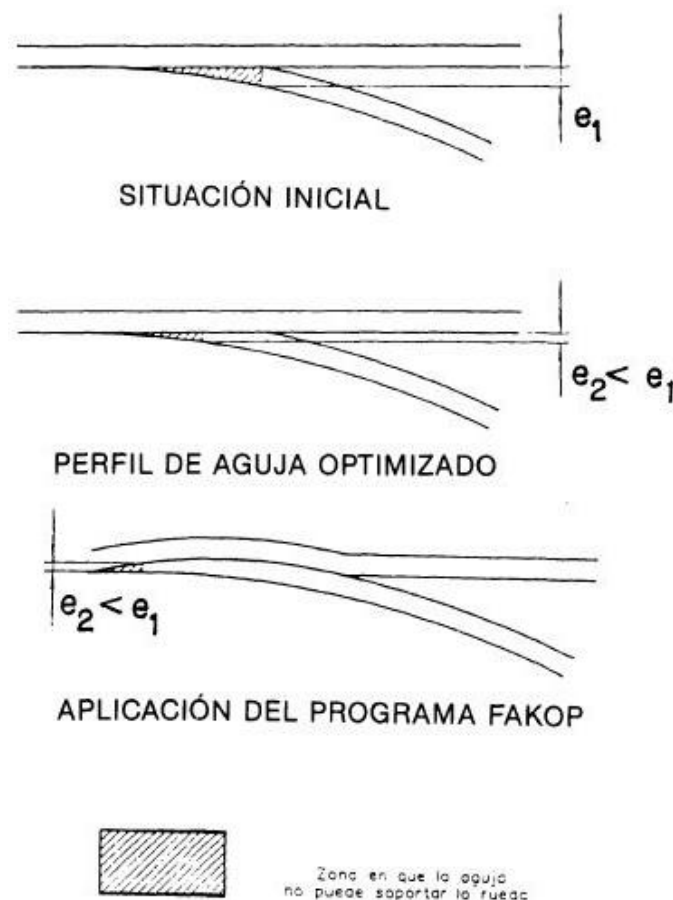


Figura 6.8 Optimización del borde activo. (Fuente: Sánchez Doblado, 1992)



6.3.1.4. Antideslizantes térmicos

Debido a las oscilaciones de temperatura y a la gran longitud de las agujas del cambio, se producen variaciones de longitud para nada despreciables.

Es necesario instalar antideslizantes térmicos que eviten la dilatación y contracción de esas piezas en relación con la contraaguja como muestra la figura 6.9.



Figura 6.9 Antideslizante térmico. (Fuente: Wang, 2015)

6.3.2. Cruzamientos móviles

La evolución técnica de los cruzamientos ha estado ligada a la evolución de los cambios, pero cabe destacar que en este elemento ha tenido una mayor repercusión respecto a otras partes del desvío.

Anteriormente se ha introducido en la problemática relativa a la existencia de la laguna de cruzamiento. Su existencia es incompatible con el sistema de alta velocidad dado que reduce considerablemente la velocidad comercial en el paso por vía desviada y afecta perjudicialmente tanto al confort del viajero como la vida útil del aparato. Se precisa entonces de nuevos elementos que eviten los problemas inducidos por el uso de aparatos de vía convencionales.

6.3.2.1. Corazón de punta móvil

La primera aplicación práctica de corazones de punta móvil se produjo en Japón (*New Sanyo Line*) (Oliveros, 1977). Como se observa en la figura 6.10, su implementación permite la eliminación de la laguna del cruzamiento. Su funcionamiento es semejante al de las agujas del cambio. A partir del movimiento de la punta del corazón que viene a acoplarse a la pata de liebre fijas correspondiente dependiendo de la dirección que se desea para el vehículo (paso por vía directa o desviada), formando así un camino de rodadura continuo. El cruzamiento, como el cambio, tiene una inclinación 1/20. La continuidad en la rodadura permite una circulación por vía desviada a mayor velocidad, una rodadura más suave, reduciendo ruidos, vibraciones y por ende mejorando el confort del pasajero además de un aumento de la vida útil inducido por la reducción de su desgaste



comparado con los cruzamientos convencionales. Cabe destacar pero que, al tratarse de una pieza móvil, requiere especial atención en su conservación y mantenimiento.

Actualmente el movimiento de la punta del corazón es posible gracias a la flexibilidad de la misma y no está articulado a través de bulones debido a que estos originaban deficiencias en su funcionamiento. Por último, para inducir dicho movimiento son necesarios motores de accionamiento y control, similares a los existentes en el cambio.



Figura 6.10 corazón de punta móvil. (Fuente: RENFE)

A título informativo cabe señalar que aún siendo ampliamente utilizados en la explotación de alta velocidad, su uso es posible en líneas convencionales dependiendo de los factores de la misma.

6.3.2.2. Corazón de patas de liebre móviles

Aunque el corazón de punta móvil es el más recomendable para alta velocidad, existen otros tipos de cruzamiento móvil.

La diferencia entre el corazón de punta móvil y el de patas de liebre móviles es que en el caso la punta del corazón es fija y son las patas de liebre las que, al ser móviles, permiten el paso del vehículo. Existe la posibilidad que solo una de las patas de liebre sean móviles o por lo contrario, que sean ambas.

La disposición de dicha tipología de corazón reduce la longitud del desvío pero requiere un sistema de accionamiento y bloqueo de mayor complejidad respecto al caso anterior. Debido a este factor y a que posee una menor resistencia los corazones de patas de liebre móviles no son utilizados en líneas de alta velocidad.



6.3.2.3. Contracarril y patas de liebre

Al existir una continuidad en el camino de rodadura, la principal función del contracarril, que es la de retener las ruedas impidiendo que estas tomen una dirección equivocada, deviene obsoleta.

En ciertos casos, la instalación de contracarriles en cruzamientos con corazones de punta móvil se mantiene por motivos de seguridad, dejando una huella mayor entre carril y contracarril. Este desplazamiento del contracarril respecto a la disposición convencional provoca que no sea activo mientras el vehículo circula en condiciones normales y solo actúe en el caso de una eventual desviación de la rueda.

Por lo que se refiere a las patas de liebre, se disponen de patas de liebre de una mayor longitud, véase figura 6.11, respecto a las convencionales para dotar al cruzamiento de una mayor estabilidad y permitir la transferencia de temperatura al carril, pero con el inconveniente de un uso mayor de material, aumentando así su precio.



Figura 6.11. Detalle pata de liebre.
(Fuente: Shanghai Bosheng Industries Co. Ltd., 2015)

6.4 Desvíos sobre vía en placa

Es de especial interés dedicar parte del estudio al análisis de los desvíos sobre vía en placa. La problemática principal es la de adecuar las sujeciones elásticas propias de este sistema al desvío y, si existieran, de sus traviesas como se observa en la figura 6.12.

Las sujeciones elásticas presentes en las vías en placa tienen como objetivo reducir la rigidez vertical del sistema por lo que permiten asientos de ninguna forma despreciables. La solución adoptada para la introducción de dichas sujeciones es la de introducirlas entre la traviesa y la placa nervada.

Dependiendo de la tipología de vía en placa no es posible realizar desvíos con la misma tecnología por lo que es necesario una variación para la instalación de dichos elementos.



Figura 6.12. Corazón móvil sobre vía en placa de hormigón.

(Fuente: López Pita, 2014)

6.5. Escapes

Los escapes para alta velocidad se diferencian de los escapes tradicionales por su trazado, mientras que los escapes tradicionales no poseen curvas de transición, la velocidad de explotación de estas líneas hace necesario el uso de clotoideas.

En la explotación ferroviaria de alta velocidad, es posible que en una misma vía circulen trenes rápidos de viajeros y de mercancías (tráfico mixto) o que, debido a labores de mantenimiento, la vía en cuestión no pueda estar operativa. Con el motivo de paliar los retrasos que se puedan ocasionar en la explotación de alta velocidad, el mantenimiento de las vías y para permitir el apartado de ciertos trenes con el objetivo de ser adelantados, se disponen escapes a lo largo de las líneas que lo requieran. El número de escapes y su distancia entre ellos viene directamente establecida según el sistema de explotación de cada línea.

6.6. Trazado de aparatos de vía de alta velocidad

El incremento de la velocidad imposibilita el uso de solo curvas circulares en líneas de alta velocidad, como sucedía en el caso de líneas convencionales ya que el valor límite de la aceleración transversal no compensada excede los límites de explotación. Cabe señalar, según ensayos dinámicos que, en el caso de los escapes clásicos, la aceleración transversal asume valores del doble del valor de cálculo (López Pita, 2006) entre la recta y la vía desviada.

Resulta necesario pues, apartarse de estos criterios de diseño tradicionales e incorporar nuevos criterios de diseño por lo que, el nuevo trazado, se introdujo el uso de curvas de transición, más concretamente de clotoideas con el objetivo de reducir dicha aceleración.

A modo de ejemplo, para el caso de un escape con velocidad de 160 km/h se obtiene, considerando ausencia de peralte:

$$\gamma_{sc} = \frac{v^2}{R} \quad (6.1)$$



Se deduce que, para una aceleración transversal sin compensar de $\gamma_{sc} = 0.5 \text{ m/s}^2$ se obtiene un radio de la curva circular de 3950.6 m, por lo que se considerará $R = 4000 \text{ m}$.

De la ecuación de la clotoide:

$$\rho l = R L = A^2 \quad (6.2)$$

Siendo:

ρ = Radio de curvatura de la clotoide

l = Longitud del arco de la clotoide

R = Radio de la curva circular

L = constante de la clotoide

Por otra parte:

$$\gamma_{sc} = \frac{V^2}{\rho} \quad (6.3)$$

Si se combinan las ecuaciones (6.2) y (6.3):

$$\gamma_{sc} = \frac{V^2}{A^2} l \quad (6.4)$$

Siendo $l = Vt$:

$$\gamma_{sc} = \frac{V^3}{A^2} t \quad (6.5)$$

$$\frac{d\gamma_{sc}}{dt} = \frac{V^3}{A^2} \quad (6.6)$$

Por lo que se obtiene, finalmente:

$$A = \sqrt{\frac{V^3}{\frac{d\gamma_{sc}}{dt}}} \quad (6.7)$$

Siendo el término $\frac{d\gamma_{sc}}{dt}$ el relativo a la variación temporal de la aceleración transversal no compensada, que toma valores entre 0.3 y 0.4 m/s^3 resulta:

$$A = 468.5 \approx 468$$

Llegados a este punto y para resolver la problemática que planteaba el cambio de sentido, se optó por la implementación de una clotoide que, partiendo del radio de la curva circular, finalizará con una curvatura igual a la de una recta (infinita) en el eje de ambas vías. Se descartó



la opción de instalar un tramo rectilíneo entre las curvas circulares ya que su implantación alargaría drásticamente su longitud.

El establecimiento de una clotoide de entrada seguida de una curva circular y una clotoide de enlace hasta el eje de comunicación, donde dichas curvaturas se invierten, viene denominada como clotoide de meseta esquematizada en la figura 6.13.

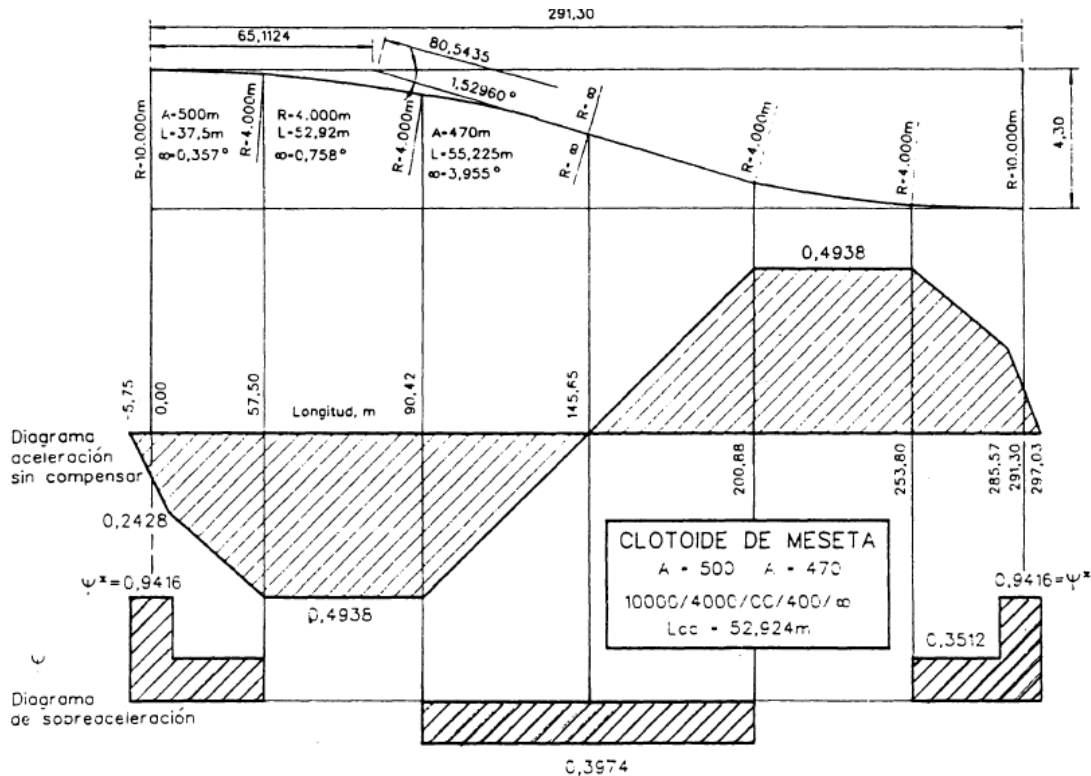


Figura 6.13 Clotoide de meseta.
(Fuente: Sánchez Doblado, 1992)

6.7 Puesta en obra

La puesta en obra de los desvíos para alta velocidad implica una gran precisión en su colocación para asegurar altas prestaciones en el servicio.

Generalmente, existen dos tipos de puesta en obra, in situ y prefabricados.

In situ:

1. En el primer caso, es necesario topografiar los puntos donde a posteriori se instalará el aparato de vía. Una vez acabado el marcaje de dichos puntos se procede al tendido y compactado de una primera capa de balasto donde se instalarán unas vías auxiliares temporales que serán utilizadas para el transporte del material.
2. Preensamblado, marcaje y desmontado del desvío para proceder a su transporte y acopio.
3. Retirada de la vía auxiliar y colocación de las traviesas.
4. Instalación de las partes del desvío en la plataforma y soldado de las mismas.



5. Instalación del desvío en la capa de balasto.
6. Riego de balasto para proceder a su bateado y perfilado.
7. Comprobación de la geometría y alineación del desvío.
8. Montaje de cerrojos y accionamiento.
9. Soldado del desvío al resto de la vía.

En el caso de puesta de cobra mediante prefabricado, la totalidad del desvío viene montado fuera de su posición final y una vez terminado simplemente se procede al transporte de la totalidad del desvío a su posición final.

6.8. Mantenimiento

Los aparatos de vía, como parte del sistema ferroviario de alta velocidad, requieren de mantenimiento para poder ofrecer sus altos niveles de calidad, seguridad y confort. En esta línea, el mantenimiento puede deberse a: mantenimientos cíclicamente preestablecidos para intentar recuperar la calidad inicial de la vía, también puede darse el caso de mantenimientos frecuentes, con el objetivo de mantener la calidad de la vía o reparaciones urgentes, que se producen cuando se detecta algún punto dañado o que pueda perjudicar las operaciones normales de la línea.

En el caso del mantenimiento de los desvíos, la *norma técnica NAV 7-5-3.1*, especifica, entre otras operaciones de mantenimiento:

- Comprobar la alineación, es decir, conocer la posición del aparato respecto de la vía tanto longitudinal como altimétricamente. En el caso de no respetar las tolerancias, deberá ajustarse.
- Descubierta de la vía y redistribución de las traviesas, retirar 5 cm de capa de balasto con el objetivo de aflojar los tirafondos para colocar correctamente las traviesas.
- Segunda alineación de la vía, para comprobar que esta sigue dentro de los rangos de tolerancia.
- Comprobación del ancho de vía, tanto de la vía directa como de la desviada.
- Perfilación y compactación del aparato a través de máquinas manuales o pesadas.
- Amolado de las caras activas de los elementos del desvío, a través de un tren de amolado, ilustrado en la figura 6.14.

La operación de amolado permite reparar posibles defectos de los carriles (defectos de fatiga, desperfectos aislados, ondulatorios) provocados por el paso de los vehículos, reduciendo vibraciones y ruidos.

En el caso de los desvíos, a diferencia de los carriles de la vía, las sollicitaciones a las que están sometidos tanto la aguja como el corazón hacen necesario que el amolado se lleve a cabo a con muelas especiales.



Figura 6.14. Detalle tren de amolado (Fuente: Vossloh, 2017)

6.9 Casos prácticos

Se analiza a continuación la disposición de aparatos de vía según diversos países. En este caso los países analizados son España, Francia y Alemania.

6.9.1 España (RENFE-ADIF)

España explota 2.852 km de vía de alta velocidad ($v > 250 \text{ km/h}$), (UIC, 2018), por lo que se hace patente la necesidad de la implantación de una tecnología de aparatos de vía segura, de altas prestaciones y económica ya que el coste de un desvío de máximas prestaciones puede rondar los 800.000€ a los que se le suma un 20% de puesta en obra (López Pita, 2006). A modo indicativo, cabe señalar que dicho tipo de desvío recibe la nomenclatura de AV (AV+ para velocidad de 220 km/h), y su nomenclatura es análoga a los descritos en el capítulo cuarto.

- Velocidad y parámetros de diseño

Los actuales aparatos de vía permiten un paso por vía desviada de 80 a 220 km/h. Su trazado en planta se adoptó un criterio de clotoide + curva circular + clotoide. Por lo que se refiere a los parámetros de diseño, se establece una aceleración transversal no compensada de 0.6 m/s^2 y una variación temporal de dicha aceleración de 0.4 m/s^3 .

- Cambio

Los desvíos tipo AV tienen las agujas elásticas de perfil bajo asimétrico de acero clase 900, tangentes a las contraagujas y con una inclinación 1/20 respecto la vertical. Están forjadas en el talón para permitir su soldadura a los carriles en el interior del desvío y la entrecalle mínima es de 58mm. La sujeción de la contraaguja es elástica indirecta, SKL-12 y Schwiagh especial esquematizada en la figura 6.15.



En el caso de la línea entre Madrid-Sevilla, se disponen del orden de 60 desvíos de 160km/h para el paso por escapes y 45 de 80km/h para vías de apartado, accionados por 8 motores en el primer caso donde cada uno de ellos dispone de un cerrojo de enclavamiento y sistema FAKOP.

Dos tipos de placas nervadas, las de asiento, que soportan uno o dos carriles con respecto a su ubicación y placas resbaladeras, de carga o de rodillos. En el primer caso la superficie de resbalamiento está tratada con molibdeno para mejorar el deslizamiento, las segundas, en cambio, facilitan el movimiento sin necesidad de engrase.

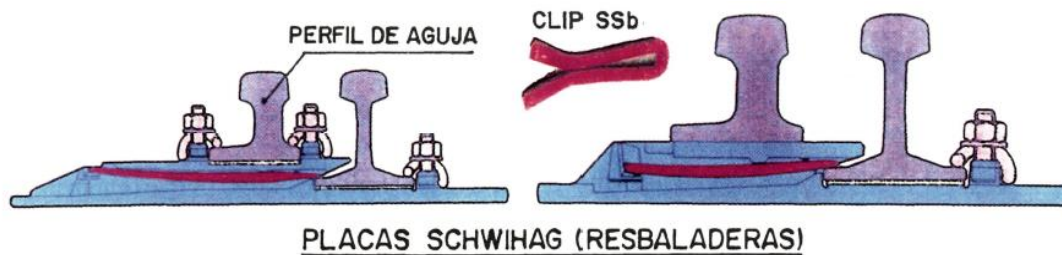


Figura 6.15. Placa Schwiag. (Fuente: Sánchez Doblado, 1992)

- Cruzamiento

Como se ha descrito anteriormente, el cruzamiento dispone de un corazón de punta móvil elástica fabricada en una cuna monobloque de acero al manganeso y accionada por motores (3 en el caso de la línea Madrid-Sevilla) por lo que no dispone de contracarriles. Y también consta de sujeción elástica SKL-12.

6.9.2 Francia (SNFC)

A diferencia de España, la primera generación de desvíos de alta velocidad se fabricó en 1981. En esta primera fase el trazado en planta consistía en una parábola cúbica. Durante la segunda generación de desvíos se cambió el trazado en planta y pasó de ser una parábola cúbica al conjunto clotoide-curva circular y se adoptaron las traviesas de homigón para el asiento de los aparatos de vía. En el presente, con la tercera generación se obtiene una velocidad comercial de 300km/h (nótese que en 1990 se obtuvo el récord de velocidad por vía directa alcanzando los 501 km/h).

- Velocidad y parámetros de diseño

La actual tercera generación de desvíos permite el paso por vía desviada a una velocidad comprendida entre 80 y 230 km/h con un trazado en planta de clotoide + curva circular alta velocidad. Para velocidades comprendidas entre 80 y 170 km/h el valor máximo de la aceleración transversal no compensada es de 0.65 m/s^2 mientras que para velocidades superiores a 170 km/h este valor se reduce hasta 0.56 m/s^2 .



- Cambio

Las agujas están fabricadas a partir de secciones de carril especiales de una pieza de acero clase 900 y tratadas térmicamente para reducir su desgaste. Para dotar de desplazamiento de las agujas se apoyan sobre placas de resbalamiento de rodillo. Las sujeciones elásticas que se disponen en el desvío son del tipo NABLA. Como en el caso español, se establece una inclinación de 1/20 respecto al eje vertical.

El accionamiento de las agujas se produce a partir de un único motor conectado a los diversos tirantes del cambio como se observa en la figura 6.16.

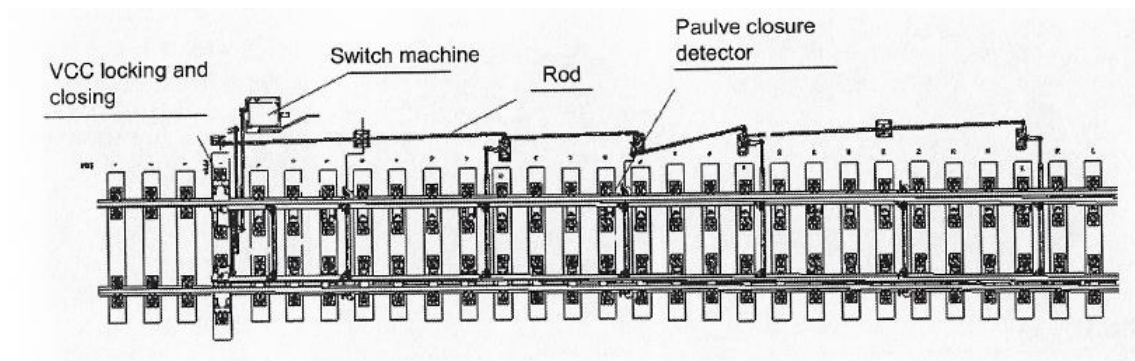


Figura 6.16. Accionamiento de los tirantes. (Fuente: Wang, 2015)

- Cruzamiento

En el caso del cruzamiento, la punta del corazón móvil está fabricada a partir de una punta y contrapunta unidas por bulones mientras que las patas de liebre están fabricadas a partir de acero al manganeso, que vienen soldadas a partir de soldadura eléctrica a los carriles fuera del desvío.

Se dispone de contracarriles posicionados de tal modo que no supongan un elemento activo, por lo que solo actuarán en caso de emergencia.

- Otros elementos

El sistema francés de alta velocidad está controlado por un sistema remoto que recaba información (temperatura, señales eléctricas, etc.). Para asegurar la correcta explotación de las líneas estas disponen de pequeños dispositivos instalados en la vía para, que según las condiciones climáticas, aumentan de temperatura y derriten hielo o nieve, permitiendo el acoplamiento de las partes móviles.

6.9.3 Alemania (DB)

La primera generación de aparatos de vía alemanes se desarrolló en la década de 1980 con un trazado en planta compuesto por una composición de dos curvas circulares, una de radio menor a la otra. Dicha solución dio como comportó un severo desgaste de la parte del cambio por lo que en su segunda generación se adoptó el esquema clotoide + curva circular + clotoide que,



sumado a la introducción de sujeciones elásticas de muy baja rigidez propiciaron su uso en aparatos de vía sobre vía en placa.

- Velocidad y parámetros de diseño

Análogamente al caso español, las velocidades permitidas por vía desviada varían entre 80 y 220 km/h, y en referencia a los parámetros de diseño, se establece una aceleración transversal no compensada de 0.5 m/s^2 y una variación temporal de dicha aceleración de 0.4 m/s^3 .

El accionamiento de las agujas se produce a partir de varios motores.

- Cambio

Para la fabricación de agujas se ha escogido acero con una resistencia a tracción de 1175MPa y fabricadas en una sola pieza que viene soldada al principio de la curva de transición. En el caso de las placas de resbalamiento aquí también se ha optado por placas de rodillo en lugar de placas de carga. También se ha adoptado el sistema FAKOP para optimizar la marcha y dotar a la aguja de una mayor resistencia. La inclinación del cambio es de 1/40, mayor que la de los países antes analizados. Las sujeciones elásticas que se disponen en el desvío son del tipo VOSSLOH.

- Cruzamiento

La punta de corazón móvil está fabricada en una sola pieza y soldada en su parte posterior a los carriles, debido a su gran longitud de la parte flexible, se dispone de dispositivos para evitar su movimiento residual y se acople correctamente contra la pata de liebre. Las patas de liebre se fabrican a partir de perfiles convencionales. No disponen de contracarriles.

En el caso de vía en placa, se instala un motor de accionamiento y bloqueo hidráulico.

- Otros elementos

Se utiliza un sistema de monitorización llamado Rodamaster2000 para controlar la posición de las agujas, el estado de los motores, temperatura y el estado de los sistemas de calentador que se instalan en el cambio y el cruzamiento.

6.10. Tendencias

La tendencia general de los diferentes países que explotan el transporte por alta velocidad es la de incrementar la velocidad comercial de los vehículos y la capacidad de la línea y por ende de la vía manteniendo altos estándares de confort del viajero al menor coste posible, por lo que se requiere de una constante evolución técnica para dar solución a las nuevas velocidades comerciales y los problemas que estas causan en su servicio sin olvidar mantener los elevados estándares de calidad relacionados con este sistema de transporte.

En el caso de los aparatos de vía, es patente el desarrollo logrado para prolongar la vida útil de estos aparatos, reduciendo así su mantenimiento, aumentando la velocidad comercial de la línea sin desprestigiar la seguridad, calidad y confort por el paso por vía desviada.



No es trivial pues que las diversas administraciones ferroviarias y las empresas especializadas en la construcción y mantenimiento de aparatos de vía tengan muy presente la investigación y desarrollo de nuevas soluciones en los aparatos de vía.

A continuación, se enumeran diversas organizaciones y empresas punteras tanto en la construcción y mantenimiento de aparatos de vía y su aportación en la implantación de nuevos diseños y tecnologías.

6.10.1. Voestalpine BWG

Voestalpine BWG es una multinacional austríaca especializada en aparatos de vía. Ha desarrollado un sistema de cambio inteligente “*i-switch*”.

Debido a los esfuerzos requeridos y a la disposición de los aparatos de vía, estos son los que, en gran parte de las ocasiones, provocan perturbaciones en la explotación de las líneas de alta velocidad. A estos factores se ha de sumar el reducido tiempo disponible para realizar operaciones de mantenimiento.

El sistema “*i-switch*” (figura 6.17) integra chips y sensores en los aparatos de vía y gracias a modelos matemáticos ‘*deep learning*’ permite predecir cambios en el funcionamiento del cambio por lo que facilita al operador ferroviario la realización de operaciones de mantenimiento y no de reparación o cambio, más costosas y que podrían provocar el corte de la línea. Según declara la compañía en su página web, este sistema también recopila datos ambientales y el resultado de pruebas de trenes para dotar a los operadores de información útil sobre su funcionamiento.



Figura 6.17. i-switch (Fuente: Voestalpine BWG, 2018)



Otro sistema innovador por parte de la empresa austríaca es la instalación de dispositivos de accionamiento hidráulico “Unistar HR”, CSV 24 y CSV 34. Dada la forma de este sistema, correspondiente a a figura 6.18, es posible instalarla entre los carriles de la vía sin la necesidad de traviesas huecas. Con este sistema, la empresa deja de utilizar placas de resbalamiento de rodillo largas lo que facilita su reajuste, engrasado y mantenimiento.



Figura 6.18. Unistar HR, CSV 24. (Fuente: International Railway Journal, 2016)

6.10.2. Vossloh Cogifer SA

Esta empresa, de origen alemán, ha patentado sistemas ferroviarios desde 1888. Su sistema hidráulico integral para desvíos “Easyswitch-R” (figura 6.19). Este sistema integra en un solo dispositivo todos los mecanismos en el espacio de una traviesa. Cada uno de los “Easyswitch-R” activa su propio tirante por lo que se evitan fallos de interconexión. Su diseño permite acceder a todos sus componentes de una forma fácil por lo que el cambio o reparación de los mismos reduce a menos de 15 minutos. Otra ventaja de este sistema es que sus dimensiones son iguales a las de una traviesa por lo que su instalación evita efectos dinámicos. Estudios llevados a cabo por la SNFC corroboran los costes durante su ciclo de vida son menores respecto a los sistemas tradicionales en gran parte debido a que se puede producir un bateado ininterrumpido mientras se pasa por el desvío.

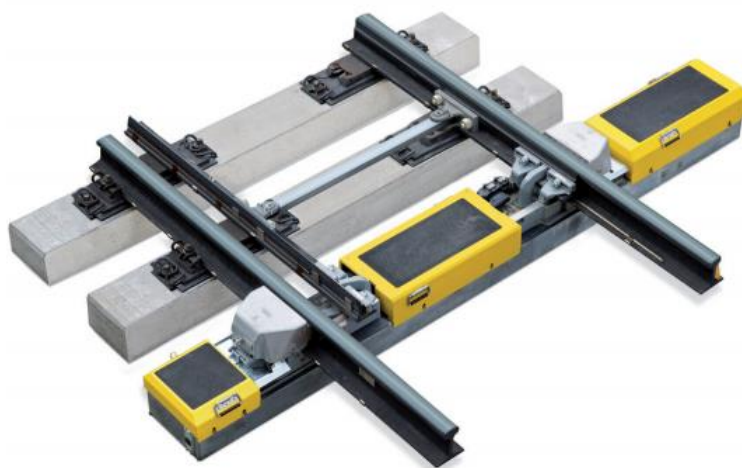


Figura 6.19. Easyswitch-R. (Fuente: Vossloh, 2016)



6.10.3. Telice

Esta compañía española ha patentado diversos sistemas calefactores para desvíos. Los casos de estudio son el “ICEBURNER” y su algoritmo “*tElphe*”. El primer proyecto está enfocado en la sustitución de calefactores de inducción y conducción, altamente ineficientes, y calefactores a gas, que pueden presentar problemas de inflamabilidad, por otros de altas prestaciones. El segundo, “*tElphe*” permite predecir las condiciones meteorológicas y habilitar los calefactores de forma automática.

La combinación de estos sistemas permite que dichos calentadores entren en funcionamiento cuando se prevean condiciones climáticas (humedad y temperatura) favorables a la aparición de hielo o nieve, que puedan entorpecer el correcto funcionamiento tanto de la aguja como de la entrecalle entre esta y la contraaguja, como muestra la figura 6.20, evitando así consumos de energía innecesarios.



Figura 6.20. Detalle agujas calefactadas. (Fuente: Telice, 2016)

6.10.4. WIRAS

Aunque este caso no pertenezca a alta velocidad, su innovación en el campo de los desvíos hace merecedor de su introducción en este capítulo. La empresa holandesa WIRAS ha diseñado un sistema llamado “*Winterproof turnout*”. Su diseño innovador consta de unas agujas que, a diferencia de los otros cambios, se mueven verticalmente guiando los vehículos según su posición. Dicho movimiento está esquematizado en las figuras 6.21 y 6.22.



El hecho de disponer de un movimiento vertical de las agujas impide que la nieve o hielo obstaculice la entrecalle, inexistente en este sistema, por lo que rinde innecesario la instalación de calefactores, produciendo un ahorro económico relativo a la reducción del consumo eléctrico, que conlleva una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero derivados de la producción eléctrica.

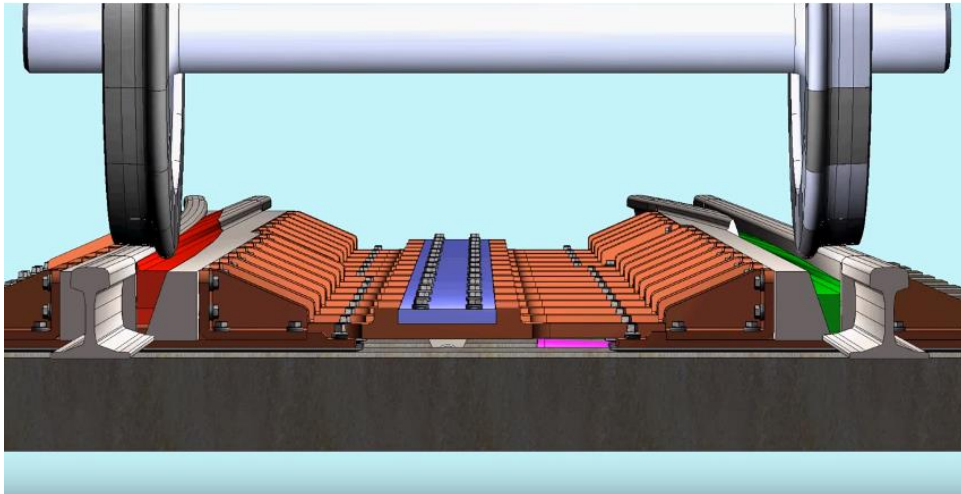


Figura 6.21. Detalle agujas. (Fuente: WIRAS, 2018)

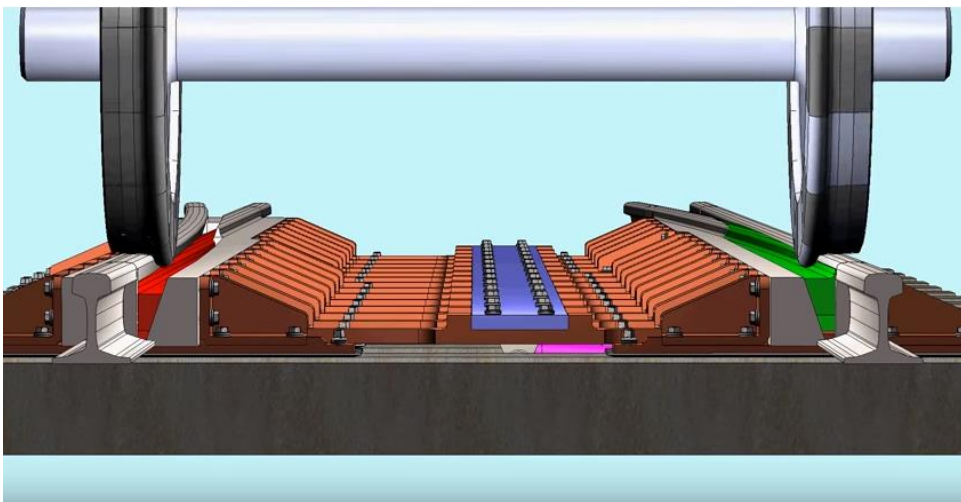


Figura 6.22. Detalle agujas. (Fuente: WIRAS, 2018)



7. CONCLUSIONES

Los aparatos de vía y, por ende, los desvíos, representan un punto singular dentro del transporte ferroviario y requieren de un estudio especial, estudio que no necesitan otros elementos de la vía. La singularidad antes comentada es aplicable también a las diferentes partes que componen el desvío, ya que es necesario un estudio separado tanto del cambio como de los carriles de unión y del cruzamiento. El motivo principal reside en que, pese a formar parte de un mismo desvío, sus características son claramente diferentes y diferenciables. Esto no implica solo su estudio separado ya que, al establecerse el desvío dentro de un sistema mayor como es la vía, deben actuar como un conjunto, puesto que un error en el funcionamiento de cualquiera de estos elementos, o su falta coordinación, puede producir consecuencias de gran repercusión en la línea.

Con la implantación del ferrocarril a escala mundial, la seguridad en los aparatos de vía devino una prioridad en su diseño, prioridad que se ha mantenido hasta nuestra época, pero ello no descartaba las necesidades del propio medio de explotación, que requería poder explotar las vías a una mayor velocidad y necesitaba desvíos que permitieran este incremento y, además, fueran lo más duraderos posible a un bajo coste. Tanto la primera como la segunda premisa se obtuvieron gracias a diversos avances tecnológicos, algunos relativos únicamente a los aparatos de vía, como la variación del tipo de perfil de la aguja y otros que se implementaban en toda la vía, como la introducción de sujeciones elásticas o las traviesas de hormigón.

Por lo que se refiere a los criterios de diseño, a pesar de las evoluciones relativas a los materiales y elementos del desvío, estos han seguido prácticamente inalterados y dominados por el uso predominante de curvas circulares como solución adoptada para el de la vía desviada.

La irrupción de la alta velocidad comercial ha supuesto una auténtica revolución en la explotación ferroviaria. Su aumento de la velocidad ha provocado la necesidad de adoptar nuevas soluciones para satisfacer los requisitos que exige este nuevo modelo de explotación, es decir, proporcionar a los usuarios de sus líneas un elevado confort sin que esto perjudique en el tiempo de viaje y asegurando su seguridad.

Los desvíos de alta velocidad no han quedado exentos de la adopción de las nuevas soluciones antes comentadas puesto que son de gran importancia para que el servicio cumpla con los parámetros de calidad establecidos, logrando un aumento considerable de la velocidad en el paso por vía desviada.

En lo que se refiere al trazado del desvío, se han implementado curvas de transición (clotoides) a las curvas circulares ya existentes en desvíos convencionales con el objetivo de reducir la aceleración centrífuga no compensada, variable clave en el confort del viajero. En cuanto a los elementos del desvío, las necesidades de la alta velocidad han propiciado, entre otras, el uso de cruzamientos de corazón móvil que permiten eliminar la laguna del cruzamiento, confiriendo mayor estabilidad al aparato.



Cabe destacar que, aunque la misión principal de estas nuevas soluciones es la de alcanzar los altos estándares de calidad propuestos, dichas soluciones afectan directamente a la vida útil del aparato, confiriéndole una mayor resistencia y reduciendo su desgaste, aumentando así su ciclo de vida.

Llegados a este punto, es importante remarcar que todos los elementos del desvío deben resultar altamente fiables y de fácil mantenimiento, todo esto al menor coste posible. Estas premisas comportan que las soluciones adoptadas deban ser lo más sencillas posibles, ya que cualquier posible fallo repercute directamente a la totalidad de la vía, pudiendo provocar retrasos en la misma.

Por último, las tendencias que se han observado indican que las nuevas generaciones de desvíos están encaminadas hacia la reducción de los costes de mantenimiento a través de sistemas control integral y remoto, capaces de predecir y detectar posibles cambios en el funcionamiento del desvío permitiendo una reparación preventiva y no un cambio del elemento, sin llegar a cortar el tráfico, reduciendo así los costes de mantenimiento.



8.Referencias

Libros:

- Bono, G.; Focacci, C.; Lanni, S. (1997) *“La Sovrastruttura ferroviaria”*. Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, Roma.
- Dow, A (2014) *“The Railway: British Track Since 1804”*. Pen and Sword. ISBN 978-1473822573
- García-Lomas y Cossio, J.M (1972). *“Tratado de explotación de ferrocarriles, Tomo I: La vía ”*. 4ª ed. Madrid: Rueda. DL M. 7849-1972
- López Pita, A. (2006). *“Infraestructuras ferroviarias”*. 2ª ed. Barcelona: Edicions UPC. ISBN 978-84-9880-435-5
- López Pita, A. (2010). *“Alta velocidad en el ferrocarril”*. Barcelona: Edicions UPC. ISBN 978-84-9880-416-4
- Oliveros Rives, F.; López Pita, A.; Megia Puente, M. (1977). *“Tratado de ferrocarriles I: Vía”*. Madrid: Rueda. ISBN 84-7207-005-0
- Wang, P. (2015). *“Designo of high-speed turnouts: Theory and applications”*. Shangái: Elsevier. ISBN 978-0-323-39617-2

Artículos:

- Lewis, M.J.T. *“Railways in the greek and roman world”*. Universidad de Hull
- Mansilla Plaza, L. *“Aproximación a la evolución de la tecnología minera a lo largo del siglo XIX”*. Univerdidad de castilla la mancha
- Mugg, P. *“Innovations in turnout technology”*. Revista: Global railway review. Noviembre 2006
- Puetz, H. *“New generations of turnouts promises to improve reliability and reduce costs”*. Revista: International Railway Journal. Noviembre 2016
- Raif, L., Bohuslav Puda, L.; Havlík, J.; Smolka, M. *“Design of high-speed turnouts and crossings”*. IOP Conference series, conference 1. doi:10.1088/1757-899X/236/1/012044
- Rodríguez Bugarín, M. (1989). *“Los desvíos: Pieza clave del ferrocarril de alta velocidad”*. Revista: DYNA. Nº 6. Agosto-septiembre 1989
- Rodríguez Bugarín, M.; García Díaz de Villegas, J.M. (1994). *“El tránsito por vía directa en los desvíos ferroviarios”*. Revista: Revista de obras públicas. Nº 3329. Febrero 1994.
- Sánchez Doblado, M. (1992). *“Desvíos”*. Revista: Informes de la construcción. Vol.44 Nº 420 Junio 1992



Serrano Martínez, J.M. (2000). *“El ferrocarril de alta velocidad en España, evolución y perspectivas frente al tercer milenio”* Revista: Nimbus.nº 5-6. Junio 2000

Coleman, I.; Comish, A. (2010). *“Predicting the future for switches and crossings”*. Revista: Global railway review. Septiembre 2010

Informes:

ADIF (1992). *“Desvíos.- Características de los tipos y modelos”*. NAV 3-6-0.1. Mayo 2018.

ADIF (1992). *“Desvíos.- Descripción general”*. NAV 3-6-0.0. Mayo 2018.

ADIF (1992). *“Desvíos.- Marcaje y envío a obra”*. NAV 7-1-3.2. Mayo 2018.

ADIF (1995). *“Conservación de la vía.- Mantenimiento de desvíos y de otros aparatos de vía”*. NAV 7-5-3.1. Mayo 2018

ADIF (2018). *“Declaración sobre la red”*. Abril 2018.

Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado (2017). *“Catálogo Oficial de Señales de Circulación Ferroviaria en la Red Ferroviaria de Interés General”*. BOE-A-2017-556. Abril 2018

Ministerio de Fomento (2015). *“Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda (PITVI) 2012 - 2024”*. Abril 2018

Comisión europea (2014). *“Reglamento relativo a las especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema «infraestructura» en el sistema ferroviario de la Unión Europea”*. No 1299/2014. Mayo 2018

Sitios web

BS Railway equipments (2018). Recuperado el día 13 de mayo a partir de <http://www.bsrailway.com/railway-turnout/>

Network Rail (2018). Recuperado el día 17 de mayo a partir de <https://www.networkrail.co.uk/>

Schwieh (2018). Recuperado el día 13 de mayo a partir de https://www.schwiehag.com/uploads/media/SCHWIEHAG_Produktbroschuere_ES_2010.pdf

Telice (2018). Recuperado el día 2 de junio a partir de <http://www.telice.es/proyectos/?category=innovacion>

UIC (2018). Union internationale des chemins de fer. Recuperado el día 7 de abril a partir de <https://uic.org/high-speed-database-maps>

Voestalpine (2018). Recuperado el día 3 de junio a partir de <https://www.voestalpine.com/blog/es/innovacion-es/turnouts-of-the-future/>

WIRAS (2018). Recuperado el día 2 de junio a partir de <http://www.winterproofturnout.info/>

